

VŠB – Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

**Vliv spínací frekvence na hluk asynchronního motoru napájeného
z měniče kmitočtu**

**Relationship between switching frequency and noise on induction
motor powered from frequency converter**

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta elektrotechniky a informatiky
Katedra elektroenergetiky

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Tomáš Gereš**
Studijní program: N2649 Elektrotechnika
Studijní obor: 3907T001 Elektroenergetika
Téma: **Vliv spínací frekvence na hluk asynchronního motoru napájeného z měniče kmitočtu.**
Relationship Between Switching Frequency and Noise on Induction Motor, Powered from Frequency Converter.

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

Hluk asynchronních strojů, zdroje, příčiny.
Výběr motoru a měniče, příprava experimentu.
Provedení srovnávacího měření hluku na soustavě měnič - motor.
Vyhodnocení měření v různých provozních režimech.

Seznam doporučené odborné literatury:


HAMATA, V.: Hluk elektrických strojů, Academia Praha, 1987
KOPYLOV, P.: Stavba elektrických strojů. SNTL Praha, 1988
PATOČKA, M.: Vybrané statě z výkonové elektroniky, VUT FEKT 2005
ČSN EN 60034-9 ed. 2., -25
Další dle pokynů vedoucího diplomové práce.

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Petr Bernat, Ph.D.**

Datum zadání: 01.09.2017

Datum odevzdání: 30.04.2018


prof. Ing. Stanislav Rusek, CSc.
vedoucí katedry




prof. Ing. Pavel Brandštetter, CSc.
děkan fakulty

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně. Uvedl jsem všechny literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Ostravě dne: *25. dubna 2018*


.....
podpis studenta

Poděkování

Je mi milou povinností poděkovat Ing. Petru Fialovi za odbornou pomoc při praktickém řešení diplomové práce, Ing. Petru Bernatovi, Ph.D. za odborné konzultace a poznatky. Poděkování patří také závodu Siemens Mohelnice za vytvoření podmínek pro realizaci této práce.

Abstrakt

Předkládaná diplomová práce je zaměřena na problematiku hluku asynchronního motoru napájeného z měniče kmitočtu. Problematika je řešena teoreticky i praktickým měřením asynchronního motoru v laboratoři pro měření hluku v Siemens Mohelnice.

Klíčová slova

Asynchronní motor; hluk; měnič kmitočtu; měření hluku; sinusový zdroj; výběr vhodného měniče kmitočtu; měření hluku asynchronního motoru, akustický tlak, akustický výkon.

Abstract

The presented work is focused on the issues of noise of induction motor feeded from frequency converter. Matter is solved theoretically and also by practical measurings in Siemens Mohelnice lab's.

Key words

Induction motor; noise; frequency converter; noise measurings; sinus supply; selecting a suitable frequency converter; measurings of noise by frequency converter, sound pressure, sound power.

Obsah

Úvod.....	- 9 -
1 Hluk asynchronních strojů, zdroje, příčiny	- 11 -
1.1 Definice zvuku	- 11 -
1.2 Akustické vlnění.....	- 11 -
1.2.1 Lineární oscilátor.....	- 12 -
1.2.2 Kmitočet	- 14 -
1.2.3 Vlnová délka.....	- 14 -
1.2.4 Akustická rychlost.....	- 15 -
1.2.5 Akustický tlak.....	- 15 -
1.2.6 Měrný akustický výkon a intenzita zvuku	- 16 -
1.2.7 Složený periodický signál a akustické centrum.....	- 19 -
1.3 Decibelové veličiny	- 22 -
1.3.1 Hladina akustického výkonu	- 22 -
1.3.2 Hladina akustického tlaku	- 23 -
1.3.3 Hladina intenzity zvuku.....	- 24 -
1.3.4 Vzájemná souvislost decibelových veličin.....	- 26 -
2 Hluk asynchronních strojů	- 28 -
2.1 Hluk elektromagnetického původu	- 28 -
2.1.1 Vliv sycení železa.....	- 28 -
2.1.2 Vliv stupňovitých harmonických na radiální síly	- 30 -
2.1.3 Vliv drážkování statoru a rotoru.....	- 32 -
2.1.4 Vliv deformace vzduchové mezery	- 33 -
2.1.5 Vliv excentricity vzduchové mezery	- 34 -
2.1.6 Zvýšení hluku při rozběhu asynchronního motoru.....	- 34 -
2.1.7 Vliv neharmonického napájení.....	- 35 -
2.2 Hluk mechanického původu.....	- 36 -
2.3 Hluk ventilačního původu	- 37 -
3 Výběr motoru a měniče, příprava experimentu.....	- 38 -
3.1 Zvolení sestavy pro měření	- 38 -
3.2 Hluková komora	- 39 -
3.3 Výběr výkonového modulu měniče	- 41 -

3.3.1	Měření akustického výkonu z jednotlivých mikrofonů	- 41 -
3.3.2	Výsledné měření hluku asynchronních motorů	- 46 -
3.3.3	Výběr vhodné výkonové jednotky	- 47 -
4	Porovnání měření hluku pro různé provozní stavy	- 48 -
4.1	Vliv frekvenčního měniče na hluk napájeného motoru	- 48 -
4.1.1	Měření pro napájecí frekvenci 50Hz	- 49 -
4.1.2	Měření pro napájecí frekvenci 60Hz	- 52 -
4.2	Mechanický a ventilační vliv na velikost hladin akustického výkonu	- 53 -
4.3	Vliv spínací frekvence měniče frekvence na akustický výkon	- 55 -
5	Závěrečné zhodnocení	- 60 -
	Seznam obrázků	- 62 -
	Seznam tabulek	- 64 -
	Použitá literatura	- 65 -

Úvod

Asynchronní motor je v dnešní době nejpoužívanější točivý elektrický stroj, který je výhradně napájen střídavým proudem. Tento točivý stroj pracuje na principu magnetické indukce a převádí elektrickou energii na mechanickou. V současné době se elektromotory využívají pro širokou škálu aplikací, např. pohony klimatických jednotek, čerpadel, obráběcích strojů, ropných plošin apod.

S velice rozšířeným využívání elektromotorů v praxi také stouply požadavky a náročnost zákazníků na způsoby sepnání a regulace. Od dříve využívaných, jednoduchých řešení, jako například přímé připojení motoru na síť, jednoduché stykačové kombinace nebo přepínače hvězda/trojúhelník na trh vstoupila vlna polovodičových přístrojů, jakými jsou softstartéry nebo měniče kmitočtu, které společně s programovatelnými automaty určují trend dnešního řízení elektromotorů.

Dalším milníkem pro vývoj elektromotorů byl vznik tzv. tříd účinnosti motorů. Tyto třídy účinnosti jsou stanoveny Evropskou směrnicí EU 2009/125/ES. Výrobci elektromotorů jsou nuceni dodržovat výše zmíněná ustanovení. Každý štítek elektromotoru musí obsahovat patřičnou třídu účinnosti pro stanovenou účinnost, která je definovaná výkonem motoru, potažmo druhem jeho napájení. Je logické, že čím větší výkon motoru uvažujeme, tím je požadavek na hodnotu účinnosti vyšší. V současné době odlišujeme čtyři druhy tříd účinností, IE1, IE2, IE3 a IE4. Dle nejnovějšího ustanovení evropské komise je předepsaná třída účinnosti pro motory s výkony vyššími než 0,75 kW včetně, třída IE3 a vyšší. Na základě splnění těchto požadavků na účinnosti výrobce získává také prohlášení o shodě definované CE značkou, která umožňuje distribuovat produkt v rámci Evropské unie. Pro motory s výkonem nižším než 0,75 kW se prozatím se zařazením do jednotlivých tříd účinností nevyžaduje a tato výjimka platí také pro osmi pólové stroje. Tyto stroje jsou definovány jako stroje s nízkou účinností.

Tlak, který je na účinnosti motorů vyvíjený, se přelévá napříč celou výrobou. Postupné optimalizování starých, často předimenzovaných řad motorů, do řad ekonomicky výhodnějších, s sebou nese s uvážením rozmanitostí tříd účinností a zákaznických požadavků velké množství variant, a tím také zvýšením výrobních nákladů. Konstrukčně to znamená úpravy v prodloužení statorových svazků, s čímž logicky souvisí nový vývoj koster, rotorových svazků, prodloužení hřídelí apod.

Zaměříme-li se na stále narůstající požadavky na účinnosti vzhledem k hluku samotného motoru, zjistíme, že dopad není vůbec pozitivní. Pokud do této problematiky budeme uvažovat i skutečnost, že napájením z frekvenčních měničů hluk elektromotoru zákonitě roste, může u levnějších produktů nastat vážný problém, jelikož s přibývajícím technickým požadavkem také roste zájem ze strany zákazníků o řízení chodu motoru frekvenčním měničem.

Dalším zcela zásadním faktorem, který má na všechny parametry motoru neblahý vliv, je stále větší a větší tlak na stále nižší a nižší cenu produktu. Obchodní oddělení stále vyžadují levnější a levnější produkt, pro konkurenceschopnost společnosti a často nucených změnách v designu motorů, bude i téma hluku motorů stále závažnějším tématem.

Samotná práce by měla sloužit převážně zákazníkům k možnosti omezení hlučnosti asynchronního motoru napájeného z frekvenčního měniče značky Siemens, přičemž pro samotné

testování byl vybrán asynchronní motor nejnovější řady 1LE1 a frekvenční měnič z nejvyspělejší standardní produktové řady Sinamics G120.

V úvodních krocích se praktická část práce zabývá výběrem správného frekvenčního měniče s ohledem na hluk motoru pro různé hladiny výkonu výkonového modulu. Následuje srovnání přírůstku hladiny akustického výkonu pro motor napájený ze síťového zdroje vůči napájení z měniče frekvence. Obě uvedená měření jsou v další kapitole porovnána s měřením mechanického a ventilačního původu hluku. Závěr práce patří analýze hluku pro různé spínací frekvence a závěrečnému vyhodnocení měření a získaných poznatků.

1 Hluk asynchronních strojů, zdroje, příčiny

1.1 Definice zvuku

Za základní pilíř akustiky se zcela jistě dá považovat zvuk, který se řadí mezi přirozené přírodní projevy a životní aktivity člověka, přičemž slyšení je jedno z nejbohatších informačních zdrojů. Podstatou slyšitelného zvuku je mechanické kmitání pružného prostředí ve frekvenčním rozsahu 20 až 20 000 kmitů za sekundu, které se šíří konečnou rychlostí určitým prostředím. Akustická vlna se ve vzduchu pohybuje rychlostí 340 m/s.

Akustika jako taková se obecně zabývá mechanickými kmity rozložených v širším frekvenčním pásmu. Pásmo dělíme do třech hladin. Jedná se o infrazvuk, slyšitelné pásmo a ultrazvuk. V této práci se budeme především hovořit o zvuku ve slyšitelném pásmu. [5]

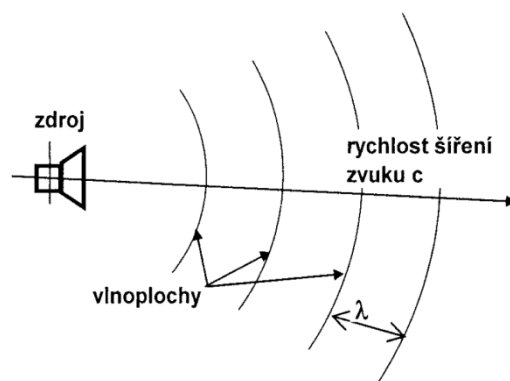
1.2 Akustické vlnění

Šíření zvuku u látek pevných, kapalných nebo v plynech definujeme ve formě tzv. akustického vlnění. Pakliže budeme uvažovat prostředí jako homogenní a izotropní, bude se vlnění šířit přímočaře. Dle kmitání částic rozdělujeme kmitání na podélné nebo příčné. Pokud částice kmitají ve směru šíření, jedná se o kmitání podélné, jestliže však je směr kmitu kolmý, jedná se o vlnění příčné. Vlnění podélné má jednoznačně stanovený směr kmitů, dochází zde k příčným kmitům. U vlnění příčného takto jednoznačnou definici použít nemůžeme. Příčné vlnění je nutné stanovit kmit v tzv. jedné rovině. Takové vlnění je možné definovat jako vlnění lineárně polarizované. [5]

Výše uvedené skutečnosti je nezbytné doplnit o skutečnost, že částice se nepochybně šířícím se vlněním, ale kmitají kolem svých rovnovážných poloh. Pro úplnost definice je nutné doplnit, že kmitající částice jsou úzce spojeny s přenosem energie. [5]

Budeme-li se bavit o šíření zvuku v kapalinách či plynech, zde se vyskytuje pouze podélné vlnění. To je zapříčiněno tím, že tyto látky jsou pružné pouze ve smyslu objemové stlačitelnosti. U elastických materiálů se můžeme setkat také s vedením příčným. Důvodem tohoto jevu je fakt, že mimo pružnosti v tlaku a tahu vykazují tyto materiály i pružnost smykovou. Kombinováním těchto druhů namáhání vzniká kmitání ohybové. [5]

Akustické vlnění postupuje prostředím od zdroje zvuku ve vlnoplochách, jak je ukázáno schematicky na Obr. 1. Vlnoplocha se vyznačuje tím, že v jejích všech bodech je v daném časovém okamžiku stejný akustický stav. Kolmice na vlnoplochu se nazývá akustickým paprskem. [5]

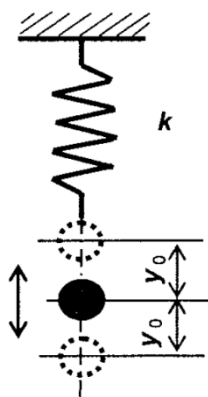


Obrázek 1.1: Šíření zvuku od zdroje ve formě vlnoploch [5]

Mezi pevnými látkami a plyny resp. kapalinami může docházet k přenosu kmitů. Každý hmotný element prostředí může být tzv. oscilátorem. Vychýlením hmotného bodu z jeho rovnovážné polohy se poruší rovnováha sil a začnou převládat síly, které se snaží hmotný bod vrátit do rovnovážné polohy. Z uvedeného vyplývá, že nejjednodušší fyzikální oscilátory, jako je např. struna, ladička, pružina apod. lze považovat za akustické generátory. [5]

1.2.1 Lineární oscilátor

Za nejjednodušší oscilátor se dá považovat oscilátor lineární, jehož schéma je možné vidět na Obr. 2. Hmotný bod se u tohoto oscilátoru pohybuje periodicky a probíhá po přímce. Časový průběh získáme diferenciální rovnicí, která taktéž vyznačuje pohybovou rovnici hmotného bodu oscilátoru.



Obrázek 1.2: Lineární oscilátor[5]

$$m \frac{\partial^2 y}{\partial \tau^2} + k y = 0 \quad (1.1)$$

kde y (m) výchylka,
 m (kg) hmotnost kmitajícího bodu,
 τ (s) čas,

k (N/m) tuhost pružiny. [5]

Tato rovnice přináší řešení, popisující tzv. volné kmity bez uvažování tlumení, jedná se o okamžitou hodnotu výchylky

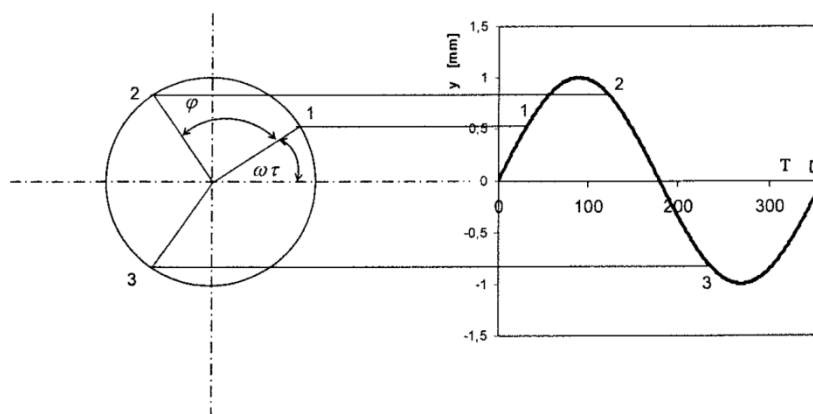
$$y = y_0 \sin(\omega_0 + \varphi_0) \quad (1.2)$$

kde ω_0 (1/s) vlastní úhlový kmitočet,

φ_0 (-) fázový úhel,

y_0 (m) amplituda výchylky kmitání. [5]

Derivováním rovnice 1.2 a zpětným dosazením do 1.1 lze získat informaci o kmitočtu, který se nazývá vlastním úhlovým kmitočtem oscilátoru.



Obrázek 1.3: Časový průběh harmonického kmitání[5]

Pakliže na oscilátor nebudou působit vnější síly, bude tento lineární oscilátor kmitat tímto kmitočtem. Z následujícího výrazu je možné vlastní úhlový kmitočet určit

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \cdot [5] \quad (1.3)$$

Na obr. 1.3 je graficky znázorněn časový průběh harmonického kmitání. Z výrazu 1.2 je naopak možné vyčíst význam jednotlivých veličin, přičemž doba kmitu T (s) vyznačuje dobu takovou, aby se kmitající bod dostal z rovnovážné polohy, přes obě krajní polohy do původního stavu [5].

Budeme-li vycházet z předpokladu, že pohyb lineárně kmitajícího hmotného bodu lze vyjádřit jako průmět vodiče y_0 , který se otáčí konstantní úhlovou rychlostí ω_0 , nabízí se využít zápisu a formulaci problému metodikou komplexních čísel, tedy Eulerova vzorce

$$\cos \varphi + j \sin \varphi = e^{j\varphi} \quad (1.4)$$

Dosadíme-li za úhel $\varphi = (\omega\tau + \varphi_0)$, je možné vyjádřit okamžitou hodnotu výchylky kmitání jako reálnou a imaginární část z výrazu, který popisuje vektor rotující konstantní úhlové rychlosti

$$Y = y_0 e^{j(\omega\tau + \varphi_0)} \quad (1.5)$$

kde Y komplexní hodnota výchylky kmitání. [5]

Ze vztahů 1.1 a 1.2 vyplývá, že se jedná o netlumený kmitající systém. Ve skutečnosti vlivem odporu okolního prostředí a vlastního vnitřního tření v materiálu pružiny dochází ke ztrátám, které mají za následek, že se amplituda zmenšuje, až se oscilátor úplně zastaví. [5]

1.2.2 Kmitočet

Kmitočet f (Hz), jinými slovy frekvence, určuje počet kmitů za sekundu, které vykoná kmitající hmotný bod. Mezi dobou kmitu a frekvencí platí jednoduchý vztah

$$f = \frac{1}{T}, \quad (1.6)$$

přičemž f (Hz) frekvence sítě,
 T (s) doba jednoho kmitu.

Podobně je možné přepočítat úhlový kmitočet ω , dle známého vzorce

$$\omega = 2\pi f. \quad [5] \quad (1.7)$$

1.2.3 Vlnová délka

Podíváme-li se na obr. 1.3, zjistíme, že součástí obrázku je také veličina λ . Tato veličina znázorňuje tzv. vlnovou délku. Vlnová délka vyjadřuje vzdálenost mezi nejbližšími dvěma body bodové řady, ale pouze tehdy, pokud je v daném okamžiku stejný akustický stav. V jednoduchosti se tento jev dá popsat jako vzdálenost, kterou zvuková vlna urazí, za dobu jednoho kmitu T . Z hlediska modelování se jedná o velice důležitý akustický parametr. Mezi vlnovou délkou λ , frekvencí f

a rychlosti šíření zvuku c platí následující vztah

$$\lambda f = c, \quad (1.8)$$

přičemž rychlost šíření zvuku je definována tímto vztahem

$$c = \frac{x}{\Delta\tau}, \quad (1.9)$$

kde x (m) vyznačuje vychýlení bodu z rovnovážné polohy,
 $\Delta\tau$ (s) vyznačuje čas nutný k uražení dráhy x rychlostí zvuku. [5]

1.2.4 Akustická rychlost

Pomocí této veličiny vyznačujeme, jakou rychlostí kmitají jednotlivé částičky prostředí, kterým se šíří akustická vlna. Tuto veličinu tedy nazýváme akustická rychlost v (m/s). Výpočet akustické rychlosti vychází z parciální derivace akustické výchylky u (m), která je definovaná následující rovnicí

$$u = u_0 \sin \left[\omega \left(\tau \mp \frac{x}{c} \right) \right], \quad (1.10)$$

kde u_0 (m) amplituda akustické výchylky,

avšak záporné znaménko platí pro šíření vlny v kladném směru osy x , naopak při šíření v kladném směru nabývá hodnoty znaménko kladné.

Nyní tedy rovnice akustické rychlosti v

$$v = \frac{\partial u}{\partial \tau} = \omega u_0 \cos \left[\omega \left(\tau \mp \frac{x}{c} \right) \right]. \quad (1.11)$$

Součin amplitudy výchylky a kruhové frekvence dává amplitudu akustické rychlosti v_0 . [5]

$$v_0 = \omega u_0. \quad (1.12)$$

Porovnáme-li vztahy 1.10 a 1.12, zjistíme odlišnosti mezi výchylkou a akustickou rychlostí. Oba vztahy se liší jak amplitudou, tak také fází. Vysvětlení nalezneme v odlišnosti funkcí použitých

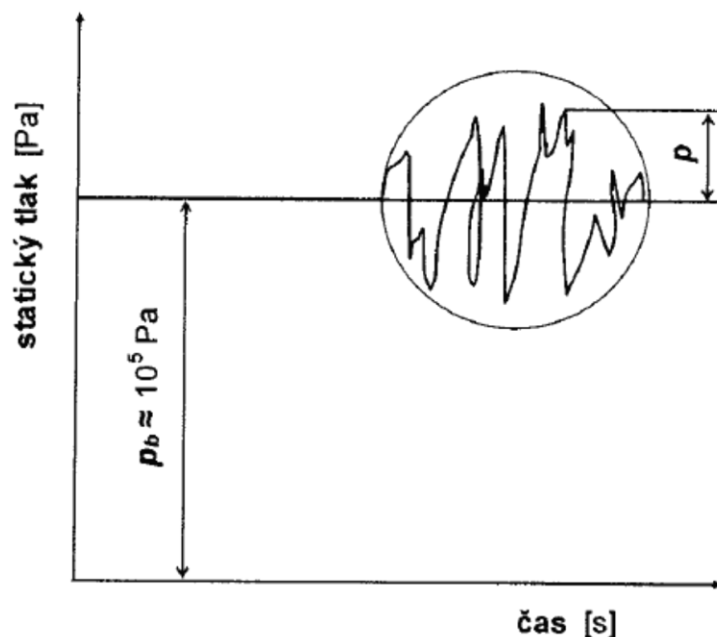
v obou vztazích, jelikož funkce sinus je vůči funkci cosinus posunuta o $\frac{\pi}{2}$. Na základě tohoto tvrzení je nutné odlišovat akustické rychlosti od šíření zvuku, jelikož velikost akustické rychlosti je o mnoho řádů menší než šíření zvuku. [5]

1.2.5 Akustický tlak

Při šíření vlnění v bodové řadě je možné v dané chvíli nalézt místa s odlišnou hustotou molekul. Tento jev je zapříčiněn tím, že v různých místech může docházet ke shluku většího počtu kmitajících molekul, ale možné je ovšem také najít místa s hustotou molekul menší. V kapalinách či plynech se takový jev dá definovat jako přetlak či podtlak. S výše definovanou skutečností přímo souvisí změny statického tlaku. [5]

Na obr. 1.4 je možné vidět celkový statický tlak, který je definován jako součet středního barometrického tlaku p_b a tlaku akustického p . Uvedený diagram je možné chápat tak, že na barometrickém tlaku je modulovaný tlak akustický. [5]

Hodnota barometrického tlaku se přibližně blíží 100 kPa, přičemž hodnoty akustického tlaku se pohybují o mnoho řádů níže. Příklad může tvořit zdravé lidské ucho, které začíná vnímat akustické tlaky řádově kole $2 \cdot 10^{-5}$ Pa. Porovnáme-li obě hodnoty, zjistíme, že hodnota akustického tlaku je vůči tlaku barometrickému zanedbatelná. [5]



Obrázek 1.4: Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu[5]

Zobrazený průběh akustického tlaku je možné z hlediska matematiky definovat totožně jako tomu bylo u definice průběhu akustické výchylky nebo akustické rychlosti. Pokud budeme uvažovat vyjádření harmonického signálu, je možné průběh akustického tlaku definovat následujícím způsobem

$$p = p_0 \cos \left[\omega \left(\tau \mp \frac{x}{c} \right) \right], \quad (1.13)$$

neboli,

$$p = p_0 e^{j\omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right)},$$

kde p_0 (Pa) představuje amplitudu akustického tlaku,

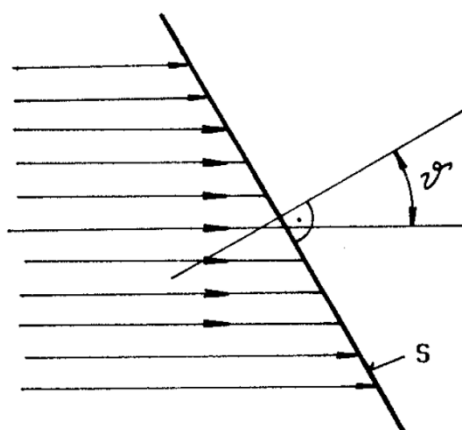
p (Pa) představuje komplexní hodnotu akustického tlaku. [5]

1.2.6 Měrný akustický výkon a intenzita zvuku

Veličiny měrný akustický výkon a intenzita zvuku spolu velmi souvisí, proto jsou uvedeny v jedné kapitole. [5]

1.2.6.1 Měrný akustický výkon

Jestliže část energie kmitající částice bude přenášena prostorem prostupující akustickou vlnou, která se dle obr. 1.5 bude šířit ve směru osy x , bude zvukový paprsek s měřicí plochou S svírat úhel ϑ . Procházející množství této energie za jednotku času definujeme pojmem akustický výkon W (W). [5]



Obrázek 1.5: Schéma rovinné vlny[5]

Pokud akustický výkon vztáhneme na jednotku plochy, je nutné zavést nový pojem - měrný akustický výkon s označením N a jednotkou $\left[\frac{W}{m^2} \right]$. Vzorcem je jej možné vyjádřit následujícím způsobem

$$N = \frac{dW}{dS \cos \vartheta} \quad (1.14)$$

kde W (W) měrný akustický výkon,
 S (m) měřící plocha,
 ϑ (°) svíraný úhel. [5]

Pokud vyjdeme z předpokladu, že každý bod uvažované rovinné vlny bude mít stejnou akustickou hodnotu, je možné vztah 1.14 zjednodušit do následujícího tvaru

$$N = \frac{W}{S \cos \vartheta} \quad (1.15)$$

Zabrousíme-li do základů mechaniky, ze které vyplývá, že výkon je dán součinem síly F a rychlosti a právě sílu nahradíme součinem akustického tlaku a plochy, na kterou tlak působí, získáme následující vzorec

$$W = Fv = pSv \quad (1.16)$$

Při volbě měřící plochy je pro jednoduchost vhodné zvolit měřící plochu tak, aby dopadající zvukové paprsky byly na plochu kolmé. Tuto úvahu volíme cíleně proto, aby hodnota $\cos \vartheta = 1$. Nyní je tedy možné zjednodušit vztah měrného akustického výkonu do tohoto tvaru

$$N = pv \quad (1.17)$$

Okamžitá hodnota měrného akustického tlaku p představuje sinusový průběh. Tento časový průběh nabývá pouze kladných hodnot, tedy akustický výkon je vždy kladný. Okamžitou hodnotu vyjadřujeme tímto vztahem

$$p = u_0 \omega \rho c \cos \left[\omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right) \right], \quad (1.18)$$

kde u_0 (m) amplituda akustické výchylky,

c (s) rychlost šíření zvuku,

ρ $\left(\frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \right)$ měrný vlnový odpor. [5]

Dosadí-li se do vztahu 1.17 za akustickou rychlost v , rychlost kmitajícího bodu vycházející z okamžité hodnoty výchylky a komplexní hodnoty výchylky kmitání a za akustický tlak z rovnice (1.18), získáme vztah pro měrný akustický výkon

$$N = u_0^2 \omega^2 \rho c \cos^2 \left[\omega \left(\tau - \frac{x}{c} \right) \right]. \quad (1.19)$$

Přirovnáním k této problematice můžeme využít názorný příklad přenášeného výkonu při napájení střídavým proudem. [5]

1.2.6.2 *Intenzita zvuku*

Jak bylo zmíněno v předchozí podkapitole, měrný akustický výkon je funkcí času. Obdobně jako v elektrotechnice, tak i pro řešení akustiky využíváme efektivních hodnot. [5]

Měrný akustický výkon je dán součinem okamžitých hodnot akustického tlaku a akustické rychlosti. Pro uplatnění již diskutovaných efektivních hodnot je vhodné zavést pojem intenzita zvuku I , která je střední hodnotou akustického výkonu [5]

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T N d\tau \quad (1.20)$$

kde T (s) doba integrace.

Budeme-li se bavit o signálech harmonických, bude tato doba nabývat hodnoty jedné periody. Než přistoupíme k řešení samotného integrálu intenzity zvuku, je vhodné definovat veličiny efektivního akustického tlaku a efektivní akustickou rychlost. Efektivnímu akustickému tlaku p_{ef} náleží následující popis

$$p_{\text{ef}} = \frac{p_0}{\sqrt{2}}, \quad (1.21)$$

a obdobně je možné definovat také efektivní hodnotu akustické rychlosti v_{ef} , tedy

$$v_{\text{ef}} = \frac{v_0}{\sqrt{2}}. \quad (1.22)$$

Vraťme se nyní k řešení integrálu intenzity zvuku. Dosadíme-li do vztahu 1.20 výraz pro rovinnou vlnu 1.19, po vyřešení integrálu získáme rovnici

$$I = \frac{1}{2} u_0^2 \omega^2 \rho c = \frac{p_0^2}{2\rho c} \quad [5] \quad (1.23)$$

Na základě použití předchozích vztahů je možné vyjádřit intenzitu zvuku I jako součin efektivního akustického tlaku a efektivní akustické rychlosti, tedy

$$I = p_{ef} v_{ef} \quad (1.24)$$

V oblasti technické akustiky lze spolehlivě přístroji naměřit pouze akustický tlak. Z tohoto důvodu se využívá rovinné vlny se skutečností, že poměr mezi akustickým tlakem a akustickou rychlostí je konstantní.

$$Z = \frac{p}{v} = \rho c \quad (1.25)$$

kde $Z = \left(\frac{Ns}{m^3} \right)$ vyjadřuje měrný vlnový odpor prostředí, ve kterém se akustická vlna šíří.

Dosadíme-li do vztahu 1.24, získáme konečný vzorec intenzity zvuku

$$I = \frac{p_{ef}^2}{v c} \quad [5] \quad (1.26)$$

Výraz 1.26 je pro technickou akustiku základním vzorcem, neboť jeho platnosti se nevyužívají pouze pro měření hluku, ale také pro další výpočty. I z hlediska experimentálního zjišťování akustických polí je tento výraz velmi důležitý, neboť pro řešení této problematiky není finančně dostupný žádný přístroj, který by umožnil přímé měření intenzity akustického vlnění. [5]

1.2.7 Složený periodický signál a akustické centrum

Akustické spektrum obecně je soubor hodnot sledované akustické veličiny uváděné v závislosti na kmitočtu. Sledovanou veličinou většinou bývá akustický tlak, akustická rychlost, intenzita zvuku, akustický výkon respektive jejich hladiny. [5]

Ve své podstatě každý zvuk kolem nás je definován akustickými signály, kmitočet je odlišný. Pro řešení této problematiky se využívají spektra zvuků. Tato spektra dělíme do dvou následujících skupin.

1.2.7.1 Spektrum čárové

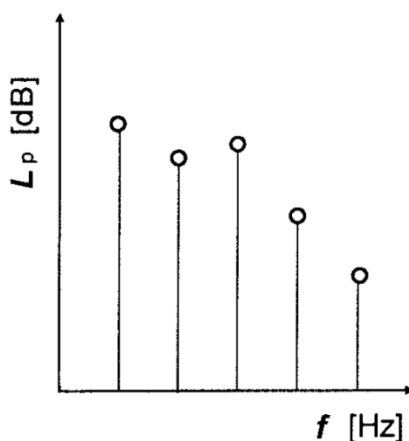
Jelikož se v běžném životě setkáváme se zvukem, který se ve většině případů dá definovat jako neharmonický signál, hovoříme tedy o periodickém nebo neperiodickém signálu neharmonickém.

Periodické signály se obecně dají rozložit pomocí Fourierové rozvojem na nekonečně mnoho harmonických signálů, jejichž kmitočty jsou násobkem základní frekvence. Pro celkový zápis akustického tlaku je tedy možné využít následující zápis

$$p = \sum_{n=1}^{\infty} A_n \sin n\omega\tau + \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cos n\omega\tau, \quad (1.27)$$

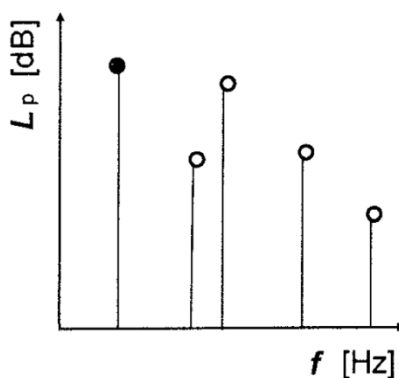
kde konstanty A_n a B_n představují hodnoty celých čísel n . [5]

Složený periodický signál je možné jednoznačně popsat, jestliže určíme jeho diskrétní složky. Takovou grafickou definici nazýváme diskrétní spektrum, které můžeme vidět na obrázcích 1.5 a 1.6. [5]



Obrázek 1.6: Diskrétní spektrum periodického signálu[5]

Složený periodický harmonický signál se vyznačuje v grafu tím, že jednotlivé složky jsou na frekvenční ose od sebe vzdáleny o celistvý násobek základního kmitočtu. Toto tvrzení je patrné z obr. 1.5. S tímto signálem se můžeme setkat například u hudebních nástrojů. [5]



Obrázek 1.7: Diskrétní spektrum neperiodického signálu[5]

U neperiodických signálů již frekvence nemají svou vzdálenost vyjádřenu poměrem celých čísel, jako tomu bylo u signálu harmonického. Příkladem takového spektra je výše uvedený obr. 1.6. Jako příklad z praxe pro tento druh signálu můžeme uvést např. kompresory, ozubené převody, výfuky a podobně. [5]

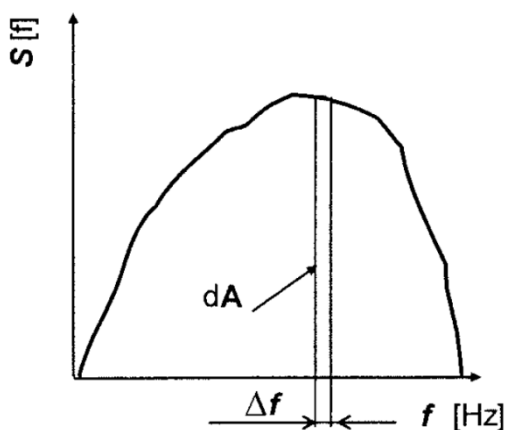
1.2.7.2 *Spektrum spojité*

U tohoto spektra je sledovaná veličina spojitě rozložená v celém kmitočtovém rozsahu. Zde je možno zařadit neperiodické děje, které jsou charakterizovány právě spojitým spektrem. U spojitých spekter je možné si představit, že se spektrální čáry k sobě kupí v nekonečné hustotě a vyplňují tak spojitě frekvenční osu, ale délka spektrálních čar zde nemůže být považována za amplitudu, protože by potom celková energie signálu rostla nad všechny meze. Proto se u spojitých spekter zavádí pojem spektrální hustoty, která číselně odpovídá amplitudě padající na frekvenční pásmo o šířce 1 Hz. [5]

Vycházejme z níže uvedeného obr. 1.7, ve kterém je spektrální hustota definována $S(f)$, následně je ji možné vyjádřit pomocí následujícího vztahu

$$S(f) = \frac{dA}{df}, \quad (1.28)$$

kde A může představovat např. akustický výkon. [5]



Obrázek 1.8: *Spojité spektrum*[5]

1.3 Decibelové veličiny

Podrobnějším zkoumáním výše uvedených veličin bychom došli k názoru, že doposud uvedené veličiny se pohybují v širokém rozsahu akustického výkonu. Z tohoto důvodu byl v technické akustice zaveden pojem hladin jednotlivých akustických veličin, jejichž jednotkou je decibel (dB). Decibelové označení se v současné době nevyužívá pouze v oboru akustiky, ale je možné se s touto jednotkou setkat například v elektrotechnice.

Zaměříme-li se na poslední dva sloupce tabulky 1.1, zjistíme, že pro použití decibelových stupnic je nezbytné stanovit tzv. referenční hodnotu. Přínos využívání decibelových hodnot je taktéž patrný z dříve zmíněné tabulky. [5]

Vyzářovaný akustický výkon W (W)		Hladina akustického výkonu L_w (dB)	
Normální zápis	Ekvivalentní exponenciální zápis	Vzhledem k $W_0 = 1W$	Vzhledem k $W_0 = 10^{-12} W$
100 000	1E+05	50	170
10 000	1E+04	40	160
1 000	1E+03	30	150
100	1E+02	20	140
10	1E+01	10	130
1	1E+00	0	120
0,1	1E-01	-10	110
0,01	1E-02	-20	100
0,001	1E-03	-30	90
0,0001	1E-04	-40	80
0,00001	1E-05	-50	70
0,000001	1E-06	-60	60
0,0000001	1E-07	-70	50
0,00000001	1E-08	-80	40
0,000000001	1E-09	-90	30

Tabulka 1.1:

Lineární a decibelová tabulka pro akustický výkon

1.3.1 Hladina akustického výkonu

Jak bylo zmíněno dříve, veličiny se mění v praxi o mnoho řádů a u akustického výkonu tomu není jinak. Příkladem může být srovnání akustického výkonu při šepotu a křiku člověka. Při šepotu nabývá akustický výkon hodnoty $1 \cdot 10^{-9} W$, přičemž křikem můžeme vyzářit do prostoru přibližně $1 \cdot 10^{-3} W$. [5]

Hladina akustického výkonu L_w je definována vztahem

$$L_w = 10 \log \frac{W}{W_0}, \quad (1.29)$$

kde W_0 (W) referenční akustický výkon $W_0 = 10^{-12}$,

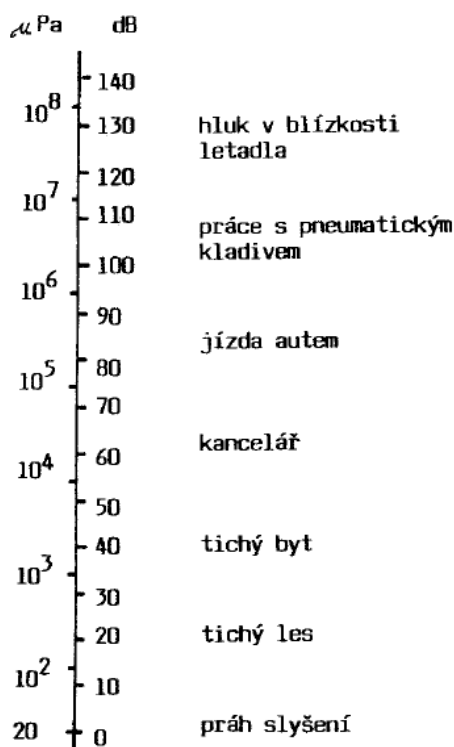
W (W) sledovaný akustický výkon.

Při každém zvýšení akustického výkonu o jeden řád se také zvýší hladina akustického výkonu o 10 dB. [5]

1.3.2 Hladina akustického tlaku

Nepoškozený lidský sluch je schopný zachytit signál odpovídající dvaceti miliontinám základní jednotky tlaku, což odpovídá $20\mu\text{Pa}$. Zajímavé ovšem je, že lidské ucho dokáže snášet akustické tlaky větší než 10^6 . Pravdou je, že lidský sluchový orgán je schopen odlišit tzv. barvu zvuku, na základě které je člověk schopný rozpoznávat zvuky o různých kmitočtech. [5]

Zvýše uvedených poznatků je patrné, že vyjadřováním hodnot v Pa by bylo velmi nepřehledné a pravděpodobně by vedlo k častým chybám. Proto i pro akustický tlak byla zavedena příslušná hladina, kterou je nutno vztahovat vždy k určitému kmitočtu. Nutností je to proto, jelikož příslušná hladina bez uvedení určitého kmitočtu nebo pásma kmitočtu postrádá význam, neboť tato hodnota nevypovídá nic o poloze signálu na kmitočtové ose. [5]



Obrázek 1.9: Hladiny akustického tlaku v různém prostředí[5]

Hladina akustického tlaku L_p (dB) je definována vztahem

$$L_p = 20 \log \frac{p}{p_0}, \quad (1.30)$$

kde p_0 (Pa) sledovaný akustický tlak (efektivní hodnota),

p (Pa) referenční akustický tlak. [5]

Tato logaritmická stupnice má jako výchozí bod referenční hodnotu akustického tlaku $p_0 = 2 \cdot 10^{-5}$ Pa, čemuž také odpovídá v decibelové stupnici 0 dB. Každému zesateronásobení akustického tlaku v (Pa) odpovídá zvýšení hladiny akustického tlaku o 20dB. Na obr. 1.10 je uveden diagram, který znázorňuje některé běžné zdroje zvuku s jejich typickými hodnotami akustického tlaku resp. hladinami akustického tlaku. K výhodám logaritmické stupnice s jednotkami v (dB) patří také to, že lépe vystihuje subjektivní sluchový vjem relativní hlasitosti než lineární stupnice s jednotkami v (Pa). [5]

Odůvodnění výše uvedeného tvrzení je možné nalézt v tom, že lidský sluch reaguje na procentní změny akustického tlaku, což odpovídá Weber-Fechnerově zákonu. Nutné je také poznamenat, že 1 dB je nejmenší změnou, kterou lidský sluch může zaznamenat. Zvýšení hladiny akustického tlaku o 6 dB odpovídá zdvojnásobení akustického tlaku. [5]

Již dříve jsme se zmínili o akustických spektrech. Při definování hladin se doposud hovořilo o jejich funkčnosti a závislosti na kmitočtu, avšak akustický výkon nebo akustický tlak jsou veličiny, které úzce souvisejí s teorií vlnění, jelikož každému vlnění odpovídá určitá frekvence nebo frekvenční rozsah. Nezbytné tedy je uvádět u hladin akustického výkonu nebo u hladin akustického tlaku rozsah kmitočtů, ke kterému daná hodnota přísluší. [5]

1.3.3 Hladina intenzity zvuku

Tato hladina je definována vztahem

$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0}, \quad (1.31)$$

kde L_I (dB) hladina akustického zvuku,

I_0 $\left(\frac{W}{m^2} \right)$ referenční hodnota intenzity zvuku,

I $\left(\frac{W}{m^2} \right)$ intenzita zvuku sledovaného akustického signálu. [5]

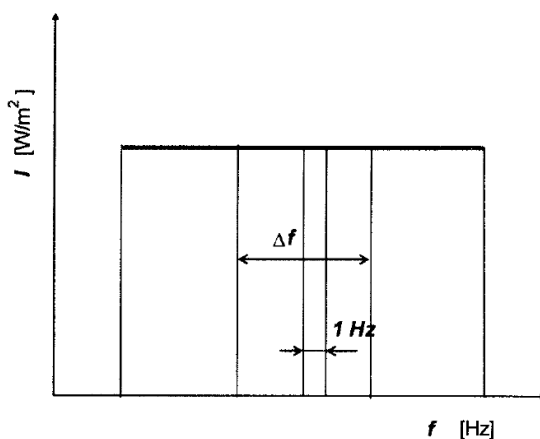
Nyní si uvedeme příklad, ze kterého bude patrná důležitost údaje o frekvenčním pásmu, ke kterému se určitá hodnota decibelového údaje vztahuje. [5]

Představme si spektrum zvuku, jehož sledovaná veličina je intenzita zvuku. Spektrum bude vyneseno pro frekvenční šíři pásma 1 Hz a bude se jednat o konstantní hodnotu, jak je možné vidět na obr. 1.11. Nastane-li situace, že nás bude zajímat hodnota intenzity při určité frekvenci v šíři pásma 1 Hz, bude ji možné z výše uvedeného obrázku snadno odečíst. Otázkou zůstává, kolik energie bude obsaženo například ve frekvenčním pásmu Δf , které má hodnotu větší než 1 Hz. Odpovědí na tuto otázku je skutečnost, že v širším kmitočtovém pásmu musí být obsaženo větší množství akustické energie, protože zde platí zákon o zachování energie. Budeme-li vycházet z teorie

výsledné intenzity zvuku při interferenci dvou vlnění, je možné intenzitu zvuku vyjádřit níže uvedeným vztahem

$$I = I_1 \Delta f \quad (1.32)$$

kde $I_1 = \left(\frac{W}{m^2} \right)$ intenzita zvuku pro šíři pásma 1 Hz. [5]



Obrázek 1.10: *Spektrum intenzity zvuku pro $\Delta f = 1 \text{ Hz}$ [5]*

Znamená to tedy, že spektra stejného zvuku zakreslená do diagramu pro různou šíři pásma nebudou dosahovat stejných hodnot. Na uvedeném příkladu se dá ukázat, že spektrum pro šíři pásma $\Delta f = 10 \text{ Hz}$ bude dávat výsledky desetkrát vyšší. Bude-li tento příklad převeden do decibelových stupnic, bude hladina intenzity zvuku ve frekvenčním pásmu o šíři 10 Hz o 10 dB vyšší než hladina intenzity zvuku pro jednotkovou šíři pásma, je možno psát na základě platnosti předcházejícího vztahu

$$L_I = L_{I_1} + 10 \log \Delta f. \quad (1.33)$$

V příkladu byla pro jednoduchost použita pásma 1 a 10 Hz, což jsou z hlediska běžné zvukoměrné aparatury pásma velice úzká. V technické praxi se vžilo použití oktávových a třetinooktávových frekvenčních pásem. [5]

Obecně platí, že v případě závislosti spektra zvuku na kmitočtu, bude nutné hladinu intenzity pro širší kmitočtové pásmo určovat ze vzorce

$$L_I = 10 \log \left[\frac{1}{I_0} \int_{f_1}^{f_2} I(f) df \right] \quad (1.34)$$

kde $I(f) = \left(\frac{W}{m^2 \text{ Hz}} \right)$ spektrální hustota intenzity zvuku. [5]

1.3.4 Vzájemná souvislost decibelových veličin

V předchozí kapitole, zabývající se intenzitou zvuku, jsme si odvodili popisující základní vztah mezi akustickým tlakem a intenzitou zvuku. Dosadíme-li tento vztah do výrazu definičního vzorce intenzity zvuku, je možné psát

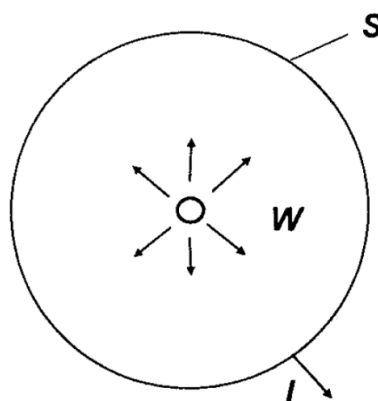
$$L_I = 10 \log \frac{I}{I_0} = 10 \log \frac{\frac{p^2}{\rho_0 c_0}}{\frac{p_0^2}{\rho_0 c_0}} = 20 \log \frac{p}{p_0} + 10 \log \frac{\rho_0 c_0}{\rho_0 c_0} \quad [5] \quad (1.35)$$

Za běžných klimatických podmínek nabývá poslední člen rovnice konstantní hodnotou 0,2 dB, tedy je možné rovnici zjednodušit do tohoto tvaru

$$L_{I_1} = L_p - 0,2 \cong L_p \quad (1.36)$$

Uvedený vzorec 1.36 má v technické akustice velký význam. Společně s měřením hladiny akustického tlaku umožňuje tento vzorec určovat hladinu intenzity zvuku. Rozdíl -0,2 dB, který je zahrnut ve vzorci, je možné zanedbat bez toho, aby byla ovlivněna přesnost akustických výpočtů či měření zvuku. [5]

Hladina akustického výkonu L_w je také vyjadřována v decibelech, avšak je nutné ji odlišovat od ostatních hladin, zejména od hladiny akustického tlaku a hladiny intenzity zvuku. Tento rozdíl si zřetelně technik uvědomí, bude-li mít na paměti, že hladina akustického výkonu určuje vždy akustický výkon vyzařovaný určitým zdrojem a je to tudíž vlastnost jen zdroje zvuku. Hladina akustického tlaku naopak určuje akustický děj v kontrolním místě resp. v místě posluchače. Tato veličina se výrazně mění se vzdáleností a směrem od zdroje, v závislosti na cestě šíření akustické energie, na okolním prostředí apod. [5]



Obrázek 1.11: Zdroj zvuku vyzařující rovnoměrně do všech směrů [5]

Pro zdroje, které vyzařují akustickou energii rovnoměrně do všech směrů, nyní odvodíme závislost mezi hladinou akustického výkonu a mezi hladinou akustického tlaku. Bude-li zdroj

obklopen měřicí plochou $S(\text{m}^2)$, jak je patrné z obr. 1.12, bude možné na této ploše stanovit měřením intenzitu zvuku. [5]

Jakýkoliv akustický výkon vyzařený zdrojem musí projít měřicí plochou, tudíž platí rovnost

$$W = IS \quad (1.37)$$

Jestliže dosadíme do tohoto definičního vzorce hladiny akustického výkonu, získáme následující rovnici

$$L_W = 10 \log \frac{W}{W_0} = 10 \log \frac{IS}{I_0 S_0} \quad [5] \quad (1.38)$$

Pravou stranu výše uvedené rovnice je možné rozdělit na dvě části. První člen v rovnici je hladina intenzity zvuku, kterou je možné nahradit na základě předchozích odvození hladinou akustického tlaku. Ve druhém členu se vhodně zvolí referenční plocha $S_0 = 1 \text{ m}^2$, takže konečný výraz bude ve tvaru

$$L_W = L_p + 10 \log S \quad [5] \quad (1.39)$$

Pro přibližně bodový malý zdroj zvuku, vyzařující rovnoměrně do všech směrů, lze konstatovat, že ve vzdálenosti 1m od středu bodového zdroje zvuku činí rozdíl mezi hladinou akustického tlaku a hladinou akustického výkonu přibližně 10 dB. Při větších vzdálenostech je tento rozdíl podstatně větší. Je to důvod, proč se firmy, vyrábějící hlučné stroje, brání zveřejnění spektra hladiny akustického výkonu, které by nemohlo být dobrou reklamou. Jsou to hodnoty podstatně vyšší, než odpovídá spektru hladiny akustického tlaku. Projektant, který se v tomto údaji splete, se dopustí velkých nepřesností v akustických výpočtech. Například chladicí věž, jejíž hladina akustického výkonu bude 100 dB, bude mít ve vzdálenosti 20 m odpovídající hladinu akustického tlaku pouze 66 dB. [5]

2 Hluk asynchronních strojů

Obecně je pojem hluk charakterizován jako soubor nežádoucích zvuků vyvolaných rychlými změnami tlaku vzduchu, jehož parametry nejsou udávány pouze fyzikálně. Významnou roli zde hraje také subjektivní postoj a citlivost posluchače. Příčiny výše popsaného jevu rozeznáváme zpravidla dvě

- a) kmitání částí nebo celého povrchu stroje, jednoslovně vibrace,
- b) ventilační hluk.

Je patrné, že bod a) je složen ze dvou částí. Pro další řešení příčin hluku je vhodné tyto příčiny řešit separátně. Příčiny hluku asynchronního stroje jsou tedy následující

- 1. Hluk elektromagnetického původu,
- 2. hluk mechanického původu,
- 3. hluk ventilačního původu.

Tyto jednotlivé tři body tvoří jeden celkový účinek tedy celkový hluk motoru. [1]

2.1 Hluk elektromagnetického původu

Pokud se zaměříme na jednotlivé složky hluku, je dobré zmínit, že právě elektromagnetický hluk je nejtíštější složkou hluku elektrického stroje.

Příčinu je možné definovat v kmitání kostry nebo jiných částí, které jsou zapříčiněné elektromagnetickými silami. Další příčinou, která je spojená s elektromagnetickým původem, je magnetostrukce magnetického obvodu. Hovoříme-li o frekvenčním spektru, tomuto původu hluku přísluší spektrum diskrétního charakteru, přičemž se zde objevuje také výrazná směrová charakteristika diskrétní složky. Tuto charakteristiku je nejlépe sledovat po odpojení stroje od sítě, kdy po vypnutí sledujeme pokles hluku v čase, přičemž pokud je pokles hluku velký, je možné definovat, že se jedná o složku elektromagnetického původu. Další zkoumání hluku je možné při opakovaných měřeních se při odlišném napájecím napětí nebo frekvenci. Obecně lze však říci, že velikost elektromagnetické složky hluku významně souvisí s návrhem stroje. Při vhodném návrhu je možné tuto složku snížit. Příkladem omezení pak může být optimální poměr statorových a rotorových drážek, natočení drážek rotoru nebo zesílení konstrukce motoru v místech, kde je motor elektromagnetickými silami namáhán více. [1]

V dalších podkapitolách si uvedeme několik vlivů, které se vznikem hluku v asynchronních strojích přímo souvisí.

2.1.1 Vliv sycení železa

Jednou z příčin vzniku nežádoucího hluku elektrického stroje je vznik vyšších harmonických, které vznikají deformací průběhu magnetického pole ve vzduchové mezeře. Příčinu deformace můžeme definovat působení radiálních sil, který bude detailněji popsán v následující podkapitole či právě vliv sycení magnetického obvodu stroje, tedy nasycení hlavního magnetického obvodu. [1]

U těchto magneticky nasycených strojů dochází vlivem ke zkreslení magnetického pole. To je dáno zakřivením magnetizační křivky železa, k tomuto jevu dochází zpravidla při rozběhu stroje. Nejvýznamnější složku budícího magnetomotorického napětí tvoří pracovní harmonická řádu $v = p$. Tato harmonická je prostorově rozložena v pvlích dle cosinusovky po obvodu vrtání stoje. Na základě zapojení statorového vinutí rozeznáváme dva případy:

2.1.1.1 Statorové vinutí spojené do trojúhelníku

Jestliže je statorové vinutí spojené do trojúhelníku, vznikne vlivem sycení železa třetí harmonická proudů, ta se v trojúhelníku uzavírá. Vznik této harmonické zapříčiní vznik harmonické třetího řádu $3p$, která vzniká v průběhu magnetomotorického napětí. Společně se základní zubovou harmonickou vodivostí zubové mezery a právě harmonickou třetího řádu, tvoří harmonické průběhy indukce ve vzduchové mezeře, které jsou definovány

$$\varsigma_1 = Q_1 \pm 3p; \varsigma_2 = Q_2 \pm 3p. \quad (2.1)$$

kde ς (T) indukce ve vzduchové mezeře,

Q_1 (-) počet drážek statoru,

Q_2 (-) počet drážek rotoru,

p (-) počet pólových dvojic. [1]

Dojde-li k přesycení některých částí magnetického obvodu s uvážením vlivu drážkování, vzniknou ve všech případech harmonické magnetické indukce, které jsou popsány ve vzorci 2.1. Při vzájemném působení stupňových harmonických magnetomotorického napětí řádu $\varsigma_1 = Q_1 \pm p$ a $\varsigma_2 = Q_2 \pm p$ s výše uvedeným magnetickým polem vzniknou za následujícího předpokladu významné složky magnetického tlaku

$$(Q_1 \pm 3p) - (Q_2 \pm p) = 0 \text{ nebo } (Q_2 \pm 3p) - (Q_1 \pm p) = 0. \quad (2.2)$$

Výše uvedený vztah dále definuje kritéria, dle kterých není vhodné volit rozdíl drážek s ohledem na hluk stroje

$$|Q_1 - Q_2| = 2p, \quad (2.3)$$

$$|Q_1 - Q_2| = 4p, \quad (2.4)$$

přičemž kritérium dle rovnice 2.4 nabývá velkého významu u dvoupólových strojů. [1]

V každém místě statoru vyvolává stupňová harmonická pulsací pole o napájecím kmitočtu. Výsledné kmitočty f_c vycházející z kmitočtů sil harmonických řádu 2.1, je možné stanovit následujícími vztahy

$$f_c = f \left[\left(\frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1-s) \right], \quad (2.5)$$

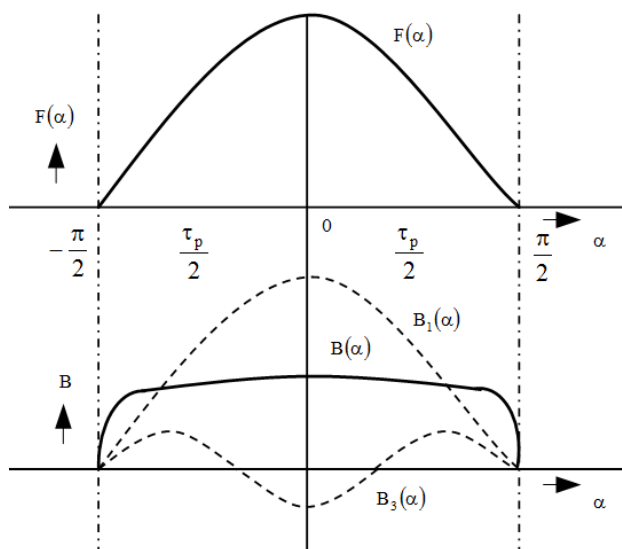
$$f_c = f \left[\left(\frac{Q_2}{p} \pm 3 \right) (1-s) \pm 2 \right], \quad (2.6)$$

kde f (Hz) kmitočet napájecí sítě,

s (-) skluz. [1]

Je tedy možné tvrdit, že na základě rovnic 2.5 a 2.6 šest kmitočetů budících sil.

Sepnutím nebo zatížením stroje se mění velikost proudu. Tyto změny působí na zvýšení amplitudy magnetomotorického napětí, což způsobuje přesycování krčků zubů. Jelikož je proměnlivá složka magnetické vodivosti ve vzduchové mezeře dána drážkováním, je zde přímá závislost s otevřením drážek. Proměnlivé otevření drážek definuje tzv. přídavný člen řádu $2p$. Tento jev je zcela analogický s vlivem deformace ve vzduchové mezeře a bude podrobněji rozebrán v dalších podkapitolách. [1]



Obrázek 2.1: Deformace průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře vlivem sycení železa

2.1.1.2 Statorové vinutí spojené do hvězdy

Spojením statorového vinutí do hvězdy je možné zamezit vzniku třetí harmonické proudu, čímž je dána nemožnost vzniku třetí prostorové harmonické magnetomotorického napětí. Na obr. 2.1 je naznačeno zploštění průběhu indukce $B(\alpha)$ ve vzduchové mezeře, jejíž zploštění nastává vlivem zakřivení magnetizační křivky železa. Důsledkem toho je vznik prostorové harmonické řádu $3p$ od, pracovní harmonické magnetomotorického napětí. [1]

2.1.2 Vliv stupňovitých harmonických na radiální síly

Vycházejme z faktu, že asynchronní stroj se stálou vzduchovou mezerou a konstantní magnetickou vodivostí $\wedge(\alpha, t) = \wedge_0$, přičemž

$$\Lambda(\alpha, t) = \Lambda_0 + \sum_{\sigma=1}^{\infty} \Lambda_{\sigma} \cos(\sigma\alpha + \varphi_{\sigma}) + \sum_{\partial=1}^{\infty} \Lambda_{\partial} \cos[\partial(\alpha - \omega_R t) + \varphi_{\partial}] + \dots \quad (2.7)$$

kde σ, ∂ (-) pro tento výraz vyjadřují řády harmonické Fourierové řady, která nahrazuje průběh vzduchové mezery na statorové (σ) a rotorové (∂) straně,

$\varphi_{\sigma}, \varphi_{\partial}$ (°) vyjadřují fázové posuny harmonických proti ose, pro kterou platí $\alpha = 0$,

ω_R ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) úhlová rychlost rotoru,

$\Lambda(\alpha, t)$ (S) magnetická vodivost vzduchové mezery,

Λ_0 (S) konstantní magnetická vodivost. [1]

Jelikož řád magnetomotorické harmonické magnetomotorického napětí ζ určuje řád libovolné interferenční harmonické magnetomotorického napětí F_{ζ} statoru a rotoru, je možné rovnici radiálního tlaku p_r mezi statorem a rotorem vyjádřit následujícím způsobem

$$p_r = \frac{\Lambda_0^2}{2\mu_0} \sum_{v=0}^{\infty} \sum_{\mu=0}^{\infty} F_v F_{\mu} \cos[(v - \mu)\alpha \pm (\omega_v - \omega_{\mu}) - \varphi_{\mu}], \quad (2.8)$$

kde p_r (Pa) radiální tlak mezi statorem a rotorem,

v, μ (-) řady libovolných magnetomotorických napětí statoru a rotoru,

F (A) magnetomotorické napětí.

Důležitou podmínkou pro vznik radiálních sil je vznik síly nízkého řádu. Tuto podmínku splníme následujícím tvrzením

$$v - \mu = r, \quad (2.9)$$

kde r libovolné číslo určující amplitudu působící síly a úhlový kmitočet řádu r .

Nejvýznamnějšími harmonickými jsou tzv. stupňové harmonické řádu $v = Q_1 \pm p$ a $\mu = Q_2 \pm p$. Dosadíme-li tato kritéria do rovnice 2.9, dosáhneme po úpravě následujících vztahů

$$|Q_1 - Q_2| = 0, 1, 2, \dots, \quad (2.10)$$

$$|Q_1 - Q_2| = 2p, 2p \pm 1, 2p \pm 2, \dots, \quad (2.11)$$

Dále je možné tvrdit, že v každém daném místě pulsuje pole každé statorové harmonické kruhovou frekvencí ω_v

$$\omega_v = \omega = 2\pi f. \quad (2.12)$$

Z rovnice pro magnetomotorické napětí rotoru odvodíme kruhovou frekvenci polí rotorových stupňových harmonických ω_μ

$$\omega_\mu = \omega \pm kQ_2\omega_R = 2\pi f \left[1 \mp k \frac{Q_2}{p} (1-s) \right], \quad (2.13)$$

kde p - počet pólových dvojic stroje,

s - skluz stroje,

k - 1,2,3...,

ω_R ($\text{rad} \cdot \text{s}^{-1}$) úhlová rychlost rotoru. [1]

Dosadíme-li rovnice 2.12 a 2.13 do rovnice 2.8, je možné určit kruhovou frekvenci kmitání radiální síly v daném místě α , $\omega_\varsigma = (\omega_v \pm \omega_\mu)$ nebo její kmitočet $f_c = \frac{\omega_\varsigma}{2\pi}$.

Úpravou dosáhneme následujícího vztahu

$$f_c = f k \frac{Q_2}{p} (1-s), \quad (2.14)$$

či

$$f_c = f \left[k \frac{Q_2}{p} (1-s) \pm 2 \right]. [1] \quad (2.15)$$

Obě rovnice 2.14 a 2.15 vyjadřují kmitočty radiálních sil, které jsou vyvolané stupňovými harmonickými, přičemž rozechvění statoru zapříčiní síly nízkého řádu, tzn. splnění podmínek stanovené rovnicemi 2.10 a 2.11 pro $k=1$. Kmitočty sil nízkého řádu jsou lineární funkcí skluzu a za určitých podmínek se mohou shodovat s kmitočty vlastních kmitů statoru. Intenzita hluku je v těchto případech zesílena rezonancí, což se projevuje při rozběhu stroje. [1]

2.1.3 Vliv drážkování statoru a rotoru

Drážkové harmonické statoru a rotoru mají stejný počet pólů, tedy i stejnou rychlost jako příslušné stupňové harmonické. Z tohoto tvrzení tedy vyplývá, že drážkové harmonické nepřinášejí pro vznik hluku žádná nová kritéria.

„V průběhu magnetického tlaku vzniknou dvě harmonické stejného řádu, avšak různého kmitočtu, je-li řád některé harmonické složky magnetomotorického napětí ζ stejný jako řád některé složky magnetomotorické vodivosti ξ (přičemž $\omega_\varsigma = \omega_\xi$). Interferencí těchto dvou harmonických se vytvoří složka tlaku s počtem vln $r=0$, stejnosměrně rozdělená po obvodu vrtání, avšak časově kmitající, což má za následek silný hluk. Vznikají tlaky nultého řádu.“ [1]

Zamezením vzniku tohoto hluku dosáhneme tehdy, pokud se řády nejsilnějších složek magnetomotorického napětí statoru i rotoru nebudou shodovat s řády některých složek vodivosti

vzduchové mezery. Nejsilnější složky harmonických magnetomotorických napětí jsou definovány $Q_1 \pm p$, $Q_2 \pm p$. Podmínky pro vznik hluku lze popsat následujícími rovnicemi

$$Q_1 \pm p = Q_2, \quad (2.16)$$

$$Q_2 \pm p = Q_1, \quad (2.17)$$

tedy

$$|Q_1 - Q_2| = p. \quad (2.18)$$

Definovali jsme tedy jedno z kritérií pro návrh bezhlučného stroje. [1]

2.1.4 Vliv deformace vzduchové mezery

Účinkem radiálních sil dochází k deformaci jha statoru. Tato deformace způsobí odpovídající deformaci vzduchové mezery. Bavíme-li se o asynchronních motorech, zde může tato deformace nabývat nezanedbatelných hodnot, pokud uvážíme minimální vzduchovou mezeru konstruovanou pro dosažení dobrého účinku. [1]

Nejdominantnější složkou síly, která působí mezi statorem a rotorem, je síla radiální. Tato síla je vybuzena pracovní harmonickou magnetického pole ve vzduchové mezeře řádu p . Zmíněné radiální síly pak mohou vyvolat deformaci vzduchové mezery. Deformaci je možné v průběhu magnetické vodivosti respektovat přidáním členem definovaným $2p$. [1]

„V případě oboustranného drážkování vzniknou v průběhu vodivosti vzduchové mezery harmonického řádu

$$\partial = Q_1 \pm 2p \text{ a } \sigma = Q_2 \pm 2p,$$

při interferenci těchto harmonických magnetické vodivosti vzduchové mezery se stupňovými harmonickými magnetomotorického napětí řádu

$$\nu = Q_1 \pm p, \mu = Q_2 \pm p$$

vznikají radiální síly nízkého řádu, platili $\partial - \mu = r$ nebo $\nu - \sigma = r$, z čehož lze odvodit další kritérium, tj. že se pro omezení hluku nemá volit

$$|Q_1 - Q_2| = 3p, 3p \pm 1, 3p \pm 2, \dots \text{“} [1] \quad (2.19)$$

Výše uvedené kritérium nabývá velkého významu pro dvoupólové motory, které jsou charakteristické tenkým statorovým jhem. V kapitole 2.1.1 byla naznačena dualita řešení při deformaci a účincích přesycených krčků zubů. Oba tyto účinky se navzájem sčítají a je nutné se uvedeným kritériím vyhnout zejména u dvoupólových strojů, čímž je možné omezit hluk motoru při jeho sepnutí, kdy se mění kmitočet rotoru a je tedy závislý na proměnlivém skluzu. [1]

2.1.5 Vliv excentricity vzduchové mezery

Do průběhu magnetické vodivosti je možné zahrnout vliv excentrického uložení rotoru. Vyjádříme-li průběh indukce v excentrické vzduchové mezeře, vyvolaný pracovní harmonickou magnetomotorického napětí, je možné napsat

$$B(\alpha, t) = B_p \{ \cos(p\alpha - \omega t) + \varepsilon \cos[(p \pm 1)\alpha - (\omega \pm \omega_\varepsilon)t] \} \quad (2.20)$$

kde B_p (T) amplituda magnetické indukce pracovní harmonické,

ε (-) poměrná excentricita,

ω_ε (rad · s⁻¹) úhlová rychlost rotoru při dynamické excentricitě. [1]

Vlivem excentricity vnikají dle výše uvedené rovnice 2.20 magnetické indukce harmonického řádu

$$v = p \pm 1. \quad (2.21)$$

Budeme-li uvažovat případ statické excentricity, která popisuje vyosení centricky nalisovaného rotoru, bude úhlová rychlost rotoru při excentricitě rovna nule. Pro tento případ platí, že i všechny tyto harmonické budou kmitat úhlovou rychlostí ω . Tyto harmonické, ačkoliv jsou nízkého řádu, nemohou způsobovat hluk, jelikož je nízký kmitočet sil. Avšak může nastat případ, kdy se při interferenci jiných harmonických vyskytne harmonická stejného řádu, ale jiného kmitočtu. Taková harmonická způsobí kmity nultého řádu. Na základě zmíněného tedy nesmí platit

$$|(Q_1 \pm p) - (Q_2 \pm p)| = p \pm 1. \quad (2.22)$$

S ohledem potenciální snížení kmitů nultého řádu je nutné stroje pečlivě vyvažovat a středit. Pro tyto kmity poté platí

$$|Q_1 - Q_2| = 3p \pm 1, \quad (2.23)$$

$$|Q_1 - Q_2| = p \pm 1. \quad (2.24)$$

Nastane-li však stav, kdy vznikne excentricita vzduchové mezery výstředným naklínováním rotoru na hřídel, změní se s úhlovou rychlostí $\omega_\varepsilon = \omega_R$ také vodivost vzduchové mezery. Při interferenci harmonického řádu $p \pm 1$ s pracovní harmonickou řádu p vznikají jednostranné magnetické tahy ($r=1$). Tento jev generuje jednostranné rotující síly, které zapříčiní vznik silného hluku. [1]

2.1.6 Zvýšení hluku při rozběhu asynchronního motoru

V praxi se objevují případy, kdy i přes správný návrh elektrického stroje dochází k podstatnému zvýšení hluku. K takovému zvýšení hluku nedochází při standardním chodu motoru, ale při přechodném jevu spínání stroje. Tuto problematiku si vysvětlujeme dvěma způsoby. [1]

První odpovědí je nadměrná velikost zapínacího proudu, který dosahuje pěti až osminásobku hodnoty proudu jmenovitého. Vysoké hodnoty proudu způsobí podstatné zesílení silových účinků

všech vyšších harmonických magnetomotorických napětí. Při rozběhu tedy dochází k významnému uplatnění síly od stupňových harmonických a od diferenčních polí, které jsou silami vyvolány. [1]

Druhou příčinou, která přispívá při zvýšení hluku v této problematice, je fakt, že při rozběhu rostou otáčky, tedy se mění i skluz stoje. Jelikož jsou kmitočty hlavních diferenčních polí závislé na skluzu, mění se tyto kmitočty během rozběhu plynule, a tím rozechvívají stator v jeho vlastních mechanických kmitočtech, ve kterých se vlivem rezonance podstatně zesiluje hluk. [1]

2.1.7 Vliv neharmonického napájení

Posledním vlivem, který si v rámci této diplomové práce rozebereme, je vliv neharmonického napájení. S čím dál častějším využíváním polovodičových spínačů, regulátorů otáček motorů, je právě tento vliv z hlediska hluku stále zkoumanějším tématem. V praxi se často setkáváme s případy, kdy zákazníci přechází ze síťových napájecích zdrojů k polovodičovým měničům frekvence a se svými dotazy na nadměrné zvýšení hluku z motoru se obrací na zákaznická centra. Velmi často takové případy vyhodnocují vadným měničem frekvence nebo vadným motorem. Další poznatky z praxe naopak říkají, že mnohdy bývá chyba přímo na straně uživatelů, kdy měnič frekvence není vhodně nastaven na štičkové parametry motoru či samotný motor je nesprávně ukotven k zařízení. Nyní se však zaměříme na hluk motoru spojený s elektromagnetismem.

Obecně polovodičové střídače představují regulátory napětí při proměnlivém kmitočtu a můžeme je také považovat za zdroje napětí a proudu. Co je ale podstatné, polovodičové střídače jsou zdroje neharmonického napětí. V porovnání se sinusovým průběhem se průběhy z těchto střídačů značně liší tím, že obsahují velké množství vyšších harmonických. [1]

Směřujme další rozbor k asynchronnímu stroji, u kterého se neharmonické napájení projeví zvýšeným obsahem tzv. časových harmonických, které se budou objevovat v průběhu magnetomotorického napětí. Pro další rozbor budeme uvažovat pouze největší časovou harmonickou řadu p . Nyní je možné definovat průběh magnetomotorických napětí statoru F_S a rotoru F_R při obecném neharmonickém napájení

$$F_S(\alpha, t) = \sum_{c=1}^{\infty} F_{Sc} \cos(p\alpha \pm c\omega t), \quad (2.25)$$

$$F_R(\alpha, t) = \sum_{c=1}^{\infty} F_{Rc} \cos(p\alpha \pm c\omega_R t + \varphi_c), \quad (2.26)$$

kde c (-) příslušný řád časové harmonické. [1]

Jestliže budeme uvažovat osově symetrické průběhy, pak může být c definováno jako liché číslo. Vztáhneme-li c k vlastnostem třífázového vinutí, bude platit

$$c = (6k \pm 1), \quad (2.27)$$

kde k (-) $k = 0, 1, 2, 3, \dots$, tedy libovolné číslo. Znaménka zde představují směr prostupu pole v rovnicích (2.25) a (2.26). [1]

„Pro sledovaný účinek vlivu neharmonického napájení na hluk stroje není nutné uvažovat vliv harmonických vzduchové mezery, které jsou ve své podstatě převážně prostorové, tudíž v rovnici

pro časově a prostorově řešený radiální tlak můžeme $\wedge_{\xi} = 0$ a uvažovat pouze s \wedge_0 . Radiální síly působící mezi státorem a rotorem budou určeny v tomto případě pouze interferenčními harmonickými magnetomotorickými napětí.“ [1]

„Uvažujme interferenci nejvýznamnější pracovní harmonické řádu p s libovolnou časovou harmonickou napájecího proudu. Pracovní harmonická řádu p vytváří podle rovnice 2.25 statorové magnetomotorické napětí o p vlnách v obvodu vzduchové mezery, které kmitá časově s úhlovou rychlostí $\omega = 2\pi f$, tj. harmonickou prvního řádu $c_p = 1$, pro kterou platí podle rovnice 2.27 $k = 0$. Libovolná vyšší časová harmonická vytváří rovněž p vln prostorově rozložených ve vzduchové mezeře, které kmitají časově s úhlovou rychlostí $\omega_c = c\omega$.“[1]

Vzájemné působení dvou uvedených harmonických zapříčiní mezi státorem a rotorem vznik radiálních sil. Prostorové rozložení výsledné rozdílové interferenční harmonické nabývá hodnoty

$$(p - p)\alpha = 0, \quad (2.28)$$

z čehož vyplývá působení konstantního tlaku ve všech směrech, což způsobí vznik kmitů nultého řádu, které znamenají potenciál pro vznik hluku. [1]

Rozdíly úhlových rychlostí uvažovaných harmonických magnetomotorického napětí určují výsledný kmitočet těchto sil

$$\omega_v = \omega_{\xi} = [(6k + 1)\omega - \omega] = 6k\omega. \quad (2.29)$$

Budeme-li napájet třífázový asynchronní motor neharmonickým napětím, při základním pracovním kmitočtu f , budou budící síly nabývat kmitočty následujících hodnot

$$f_v = 6kf, \quad (2.30)$$

kde k - opět představuje libovolné celé číslo. [1]

Uvážíme-li hodnotu pracovního kmitočtu $f = 50\text{Hz}$, radiální síly budou vznikat při kmitočtech $f_v = 300, 900, 1200, \dots, \text{Hz}$. [1]

Avšak velikosti radiálních sil jsou závislé na skladbě vyšších časových harmonických napájecích napětí. U běžných šestipulsních či dvanáctipulsních střídačů je výskyt časových harmonických u napájecího napětí na 5, 7, 11 nebo 13 harmonické, kde tyto harmonické nabývají největšího významu. [1]

Jelikož se měniče frekvence používají výhradně pro regulaci otáček, je nutné počítat s celým kmitočtovým rozsahem. Kmitočtové spektrum pak může být dále zesilováno i dalšími vlivy, např. rezonančními kmitočty statoru či nadměrnou velikostí proudu při rozběhu motoru.

2.2 Hluk mechanického původu

Mezi zdroje mechanického hluku patří výhradně rotační části elektrického stroje. Zahrnout zde můžeme valivá ložiska nebo nesprávné vyvážení dalších rotujících částí. Nežádoucí hluk ve valivých ložiskách vzniká zejména v nerovnostech valivých částí a mění se s rychlostí otáčení stroje. Je tedy logické, že u víceotáčkových strojů bude nutné věnovat těmto příčinám větší pozornost než u strojů

šesti či osmipólových. Charakter vyzařovaného spektra je čistě diskrétní a výrazné frekvence jsou rovné otáčivé rychlosti. Pro omezení hluku rotačních částí je dobré dbát na správné vyvážení stroje a v případě valivých ložisek provádět pravidelnou výměnu tuku v ložiscích. [1]

Další zdrojem, který při nesprávné konfiguraci může mít v oblasti hluku velký vliv, je samotná montáž elektrického stroje, či případně montáž stroje přímo k zařízení. Pro zamezení je vhodné dbát pečlivě na to, aby jednotlivé části elektrického stroje či části připojení k zařízení byly pečlivě utaženy. I přesto však můžeme dosáhnout tzv. deformující montáže. Tu je možné odstranit opakovaným smontováním stroje. Zaměříme-li se na samotné připojení k poháněnému zařízení, je nutné, aby spojení mezi oběma stroji bylo odděleno pružným spojením. Dalším nežádoucím zdrojem hluku může být dření v částech stroje. [1]

Neopomenutelný vliv na chvění a hluk stroje má také změna teploty. Amplituda chvění i hluku se bude měnit se vzrůstajícím oteplením stroje. Příkladem této definice může být ustálení stroje na pracovní teplotu od jeho spuštění. [1]

Mechanický hluk, ale i chvění, je v současnosti často řešeným problémem v konstrukčních odděleních, a to z důvodu snížení výrobních nákladů produktu či naléhání na stále vyšší a vyšší účinnosti motorů.

2.3 Hluk ventilačního původu

Jak je již z názvu patrné, zdrojem ventilačního hluku je samotný ventilátor ve spojení s blízkým okolím. Jelikož je ventilátor součástí hřídele, hluk bude úměrně stoupat či klesat s rychlostí otáčení motoru. Pokud se podíváme na konstrukci stroje a navážeme na poslední odstavec z předchozí kapitoly, zvýšené požadavky na účinnosti motorů zapříčiňují, že motory v současné době obsahují mnohem více aktivního materiálu, nežli tomu bylo dříve. Přímě úměrně tento fakt může souviset s velikostí použitého ventilátoru, jelikož čím více aktivního materiálu použijeme, tím se motor bude chladit lépe. Je tedy možné používat menší ventilátory než u motorů s nižšími účinnostmi, protože motory s vyšší účinností jsou zpravidla chladnější. Toto tvrzení je při pohledu na ventilační ztráty přívětivé, jelikož samotný ventilátor je dominantním zdrojem ventilačního hluku.

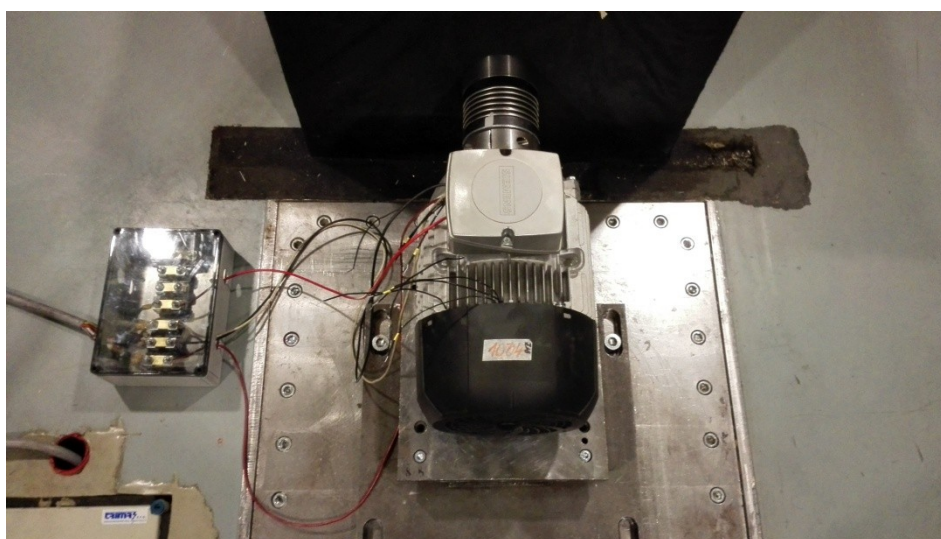
„Frekvenční analýza ventilačního zvuku dále ukazuje, že charakter spektra může být široko pásmový nebo naopak diskrétní. V prvním případě jde o aerodynamický hluk, který vzniká vlivem turbulentního proudění v lopatkových kanálech a v blízkosti vstupní, ale hlavně výstupní hrany lopatek. Přímým zdrojem hluku jsou tlakové pulsace vznikající na hraně lopatek. Tyto pulsace jsou nerovnoměrné jak v prostorovém, tak v časovém uspořádání, takže vyzařované frekvenční spektrum aerodynamického hluku je širokopásmové a obsahuje složky celého slyšitelného pásma. Naproti tomu diskrétní charakter spektra (mluvíme někdy o sirénovém jevu) může vzniknout tehdy, jsou-li před ventilátorem nebo za ním překážky, např. ve formě rozváděcích lopatek, žaluzií apod. Díky těmto překážkám není rychlostní profil vzdušného toku rovnoměrný po celém obvodu kola, což vede k periodickým tlakovým pulsacím, které pak způsobují hluk sirénového charakteru. Obdobně mohou konstrukční dutiny stroje (např. ventilační kanály) rezonovat jako Helmholtzův rezonátor a zesílit z širokopásmového spektra některé diskrétní kmitočty.“ [1]

3 Výběr motoru a měniče, příprava experimentu

Kapitola pojednává o výběru vhodné sestavy motoru a měniče pro měření a analýzu hluku pro vybrané případy. Je zde možné najít také informace o hlukové komoře v areálu Siemens Mohelnice, kde bylo měření provedeno.

3.1 Zvolení sestavy pro měření

Při rozmyšlení nad výběrem vhodného motoru a frekvenčního měniče jsem se snažil zohlednit nejrůznější faktory. Jelikož je tato práce určena zákazníkům společnosti, pro kterou pracuji, rozhodující faktor připadl osová výška, pro kterou je odběr motorů největší. S výběrem motoru samozřejmě přímo souvisí výběr frekvenčního měniče.



Obrázek 3.1: Použitý asynchronní motor značky Siemens - 1LE1092-1CB03-3AB4

Na základě výsledků obdržených z oddělení kalkulací, s ohledem na odebrané množství, se jevila nejlépe osová výška 132. Z široké škály druhů elektromotorů jsem zvolil motor určený přímo pro provoz s měničem frekvence, konkrétně 1LE1092-1CB03-3AB4. Jmenovité parametry motoru je možné vidět v následující tabulce

Název parametru	Jednotka	Hodnota pro 50Hz
Jmenovitý výkon na hřídeli	kW	5,5
jmenovité sdružené napětí	V	380,0
jmenovitý fázový proud	A	12,0
fázový posuv mezi napětím a proudem	-	0,8
jmenovitý moment	Nm	36,2
účinnosti při jmenovitém zatížení	%	84,7
otáčky při jmenovitém zatížení	min ⁻¹	1450,0
skluz	%	3,3
poměr proudu nakrátko ku jmenovitému	-	5,7
poměr maximálního momentu ku jmenovitému	-	2,7

Tabulka 2.1: Jmenovité parametry motoru pro 50Hz

Ze široké škály měničů frekvence Siemens se jako vhodnou volbou jeví vybrání nejnovější řady měničů Sinamics G120. Obecně jsou měniče Siemens této řady specifické tím, že jsou modulární a dají se složit ze dvou částí. První částí je jednotka řídicí a druhou jednotka výkonová. Jednotky řídicí jsou ve většině případů stejné pro velkou škálu výkonů a možnosti využití frekvenčního měniče. Právě možnost využití měniče pro různé aplikace nám dává jednotka výkonová, kdy dle typu výkonové jednotky je možné se stejnou jednotkou řídicí dosáhnout specializovaného měniče, např. pro čerpadla a ventilátory (Sinamics G120P), pro jejichž rozběh je vhodná kvadratická charakteristika nebo pro těžké rozběhy a náročné zátěže, k čemuž je určen právě námi využitý měnič.



Obrázek 3.2: *Měnič frekvence Sinamics G120, vlevo jednotka výkonová, vpravo jednotka řídicí*

Možnosti složení frekvenčního měniče ze dvou částí jsem prakticky využil při měření, které je popsáno v kapitole 3.3, kdy jsem využil jedné řídicí jednotky a třech druhů jednotek výkonových o odlišných nominálních výkonech.

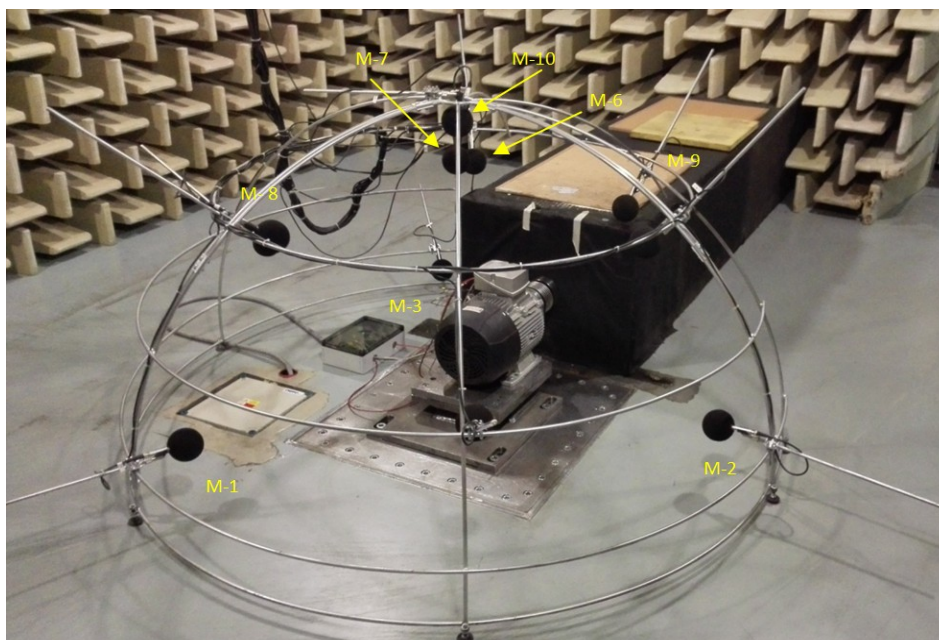
3.2 Hluková komora

Bylo již zmíněno, že hluková komora se nachází v prostorách Siemens Mohelnice a je součástí vývojové zkušebny. Měření této úlohy probíhalo za standardního provozu, bylo tedy nutné zabezpečit, aby se při měřených úlohách nepřevážely motory z haly na halu, protože i takové malé otřesy a hluk způsobený např. jízdou vysokozdvizným vozíkem, by mohlo měření znehodnotit, ačkoliv je místnost odtlumená od okolí, jak je možné vidět na následujícím obrázku.



Obrázek 3.3: *Komora pro měření hluku*

Sestava pro měření hluku se skládá z vyhodnocovacího zařízení - analyzátoru zvuku a deseti mikrofónů v místě měření, jak je možné vidět na dalším obrázku. Mimo měření hluku je možné v místnosti provádět měření napětí, proudu, momentu, otáček či také výkonu.



Obrázek 3.4: *Detailní zobrazení měřeného motoru s mikrofony 1-10 (M-1,..., 10)*

Očíslování jednotlivých mikrofónů využijeme v následující kapitole, kde budeme zkoumat, který mikrofón bude zdrojem největšího hluku.

3.3 Výběr výkonového modulu měniče

Jelikož by tato práce měla sloužit zákazníkům Siemens, kteří využívají pro své zařízení měniče a motory Siemens, jevílo se zajímavou variantou pro začátek diplomové práce porovnat velikosti akustického výkonu pro různé druhy výkonových jednotek v různých výkonových škálách. V laboratoři Siemens se pro motor o výkonu 5,5kW nabízelo využít výkonových jednotek o výkonech 7,5kW, 15kW a 45kW, kde 7,5kW představuje nejekonomičtější řešení s uvažováním možné proudové přetížitelnosti, výkon 15kW nadstandardní proudové přetížitelnosti měniče a 45kW je spíše experiment pro využití v případě poruch apod.

Výběr výkonové jednotky jsem rozdělil do dvou měření, přičemž první bude spočívat v analýze hluku pro jednotlivé mikrofony a druhému bude náležet vyhodnocení, jaké se v praxi standardně využívá, pro stanovení akustického výkonu motoru L_w .

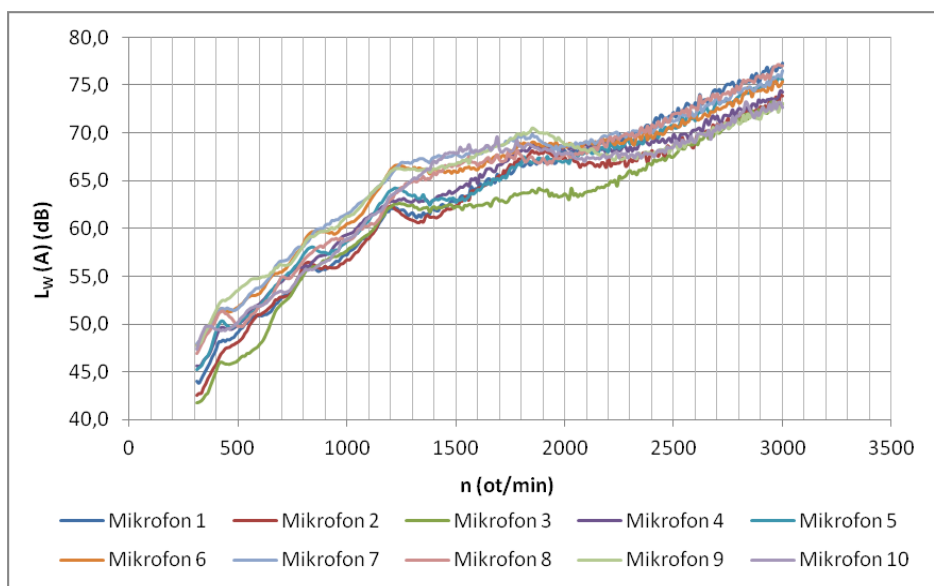
3.3.1 Měření akustického výkonu z jednotlivých mikrofonů

Na obr. 3.4 můžeme vidět rozložení pozic jednotlivých mikrofونů. Nyní provedeme srovnání velikosti akustického výkonu pro jednotlivé mikrofony pro vybrané výkonové jednotky.

Všechna měření proběhla pro výchozí hodnotu spínací frekvence frekvenčního měniče, tedy pro hodnotu 4kHz v rozsahu otáček 310-3000 ot./min.

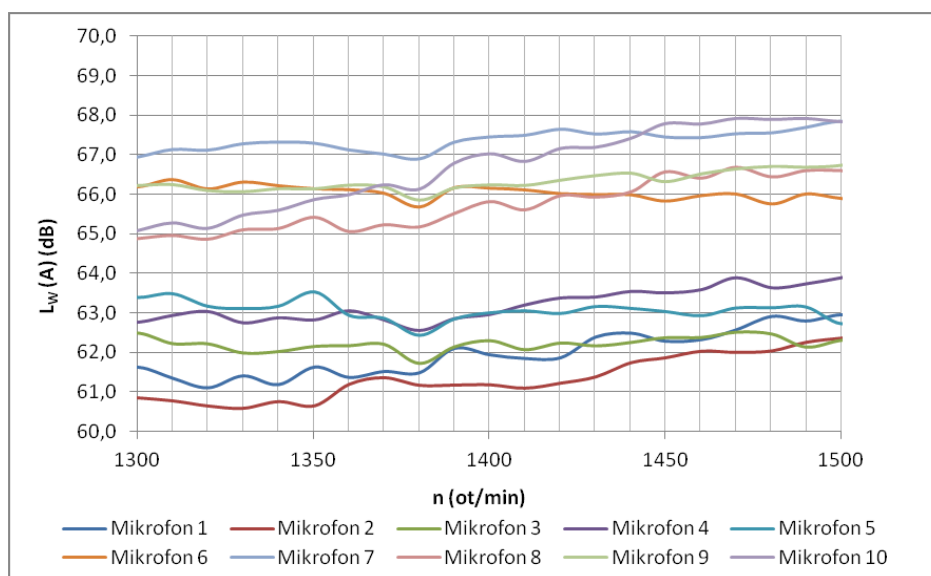
3.3.1.1 Výkonová jednotka 7,5kW

První měřenou výkonovou jednotkou byl modul o výkonu 7,5kW, představující rozumnou volbu z hlediska pořizovacích nákladů, avšak s nižší možností přetížení.



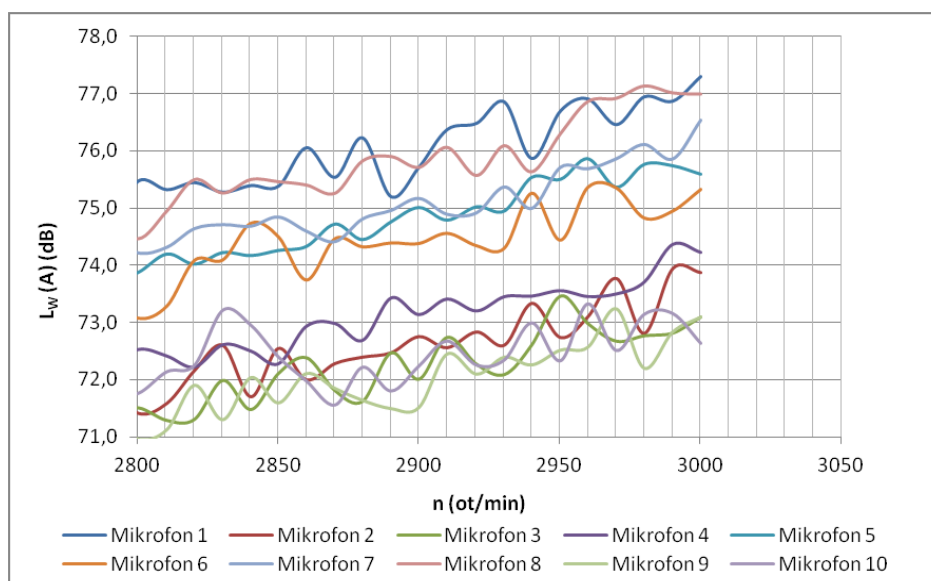
Obrázek 3.5: Závislost hladiny akustického výkonu na otáčkách motoru pro výkonovou jednotku 7,5kW

Z grafu 3.5 je patrné, že rozdíl ve velikostech akustického výkonu jednotlivých mikrofونů se pohybuje v rozmezí 4-6 dB. Přičemž v době spuštění měření, tedy v 310 ot./min, nabývá nejnižší hodnoty 41,7 dB mikrofon č.3, naopak nevyšší hodnota 47,4 dB patří mikrofonu č.10.



Obrázek 3.6: *Detailní zobrazení závislosti 1.17. pro rozsah otáček 1300-1500 ot./min, pro výkonovou jednotu 7,5kW*

Zaměříme-li se na průběhy z obr. 3.6, zjistíme, že velikosti průběhů akustického výkonu jsou rozděleny do dvou skupin. Nejvyšší hodnotu zde opět představuje mikrofon č. 7, konkrétně 67,9 dB, a to pro hodnotu otáček $n = 1500 \text{ ot./min}$, kterou simulujeme měřený chod naprázdno.



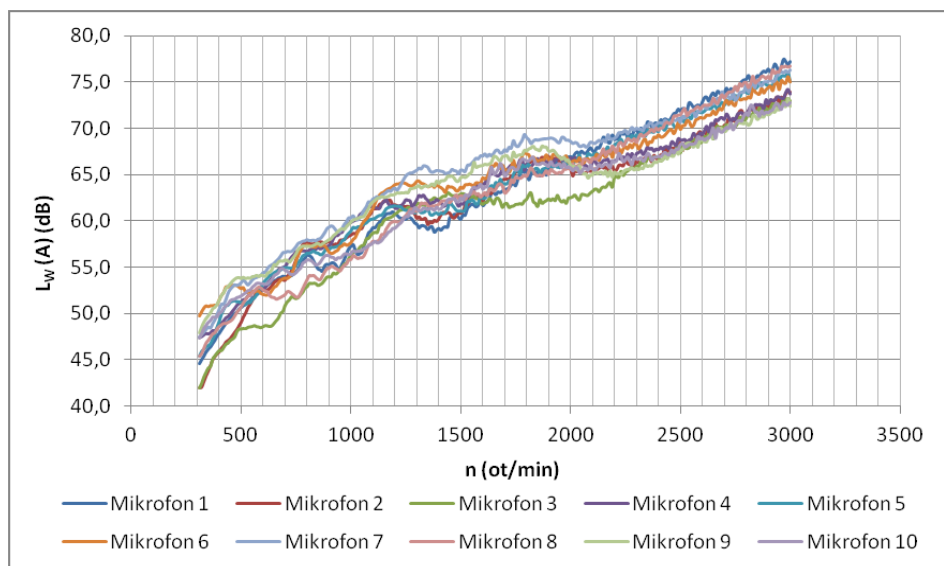
Obrázek 3.7: *Detailní zobrazení závislosti 1.17. pro rozsah otáček 2800-3000 ot./min, pro výkonovou jednotu 7,5kW*

Poslední graf 3.7 v této podkapitole znázorňuje vyústění velikosti akustického výkonu pro měřenou hodnotu otáček $n = 3000 \text{ ot./min}$, tedy dvojnásobnou hodnotu otáček jmenovitých. Jestliže srovnáme průběhy jednotlivých mikrofonů v rámci všech tří uvedených grafů v této podkapitole, je zajímavé zaměřit se na průběh znázorňující mikrofon 1, který dosahuje při $n = 3000 \text{ ot./min}$ nejvyšší hodnoty akustického výkonu 76,9 dB. Budeme-li sledovat daný průběh ve všech třech znázorněných situacích,

je patrné, že jeho velikost prudce stoupá až v hodnotách otáček vyšších než jmenovitých. Je tedy možné definovat průběh tohoto mikrofonu jako představitele ventilační složky hluku.

3.3.1.2 Výkonová jednotka 15kW

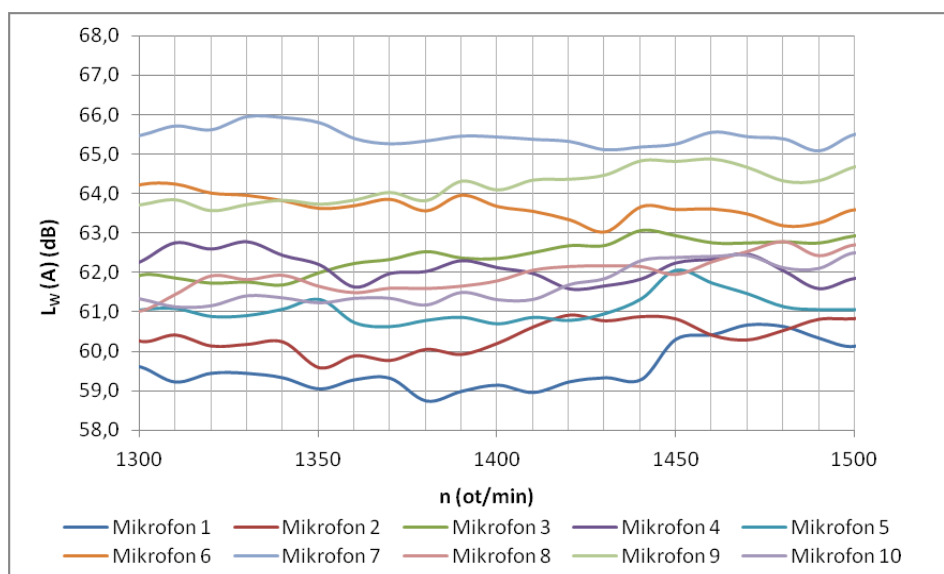
Druhou zkoumanou variantou byla výkonová jednotka o nominálním výkonu 15 kW. Pořizovací náklady této jednotky jsou řádově o několik tisíc vyšší, ale možnost přetížení je výrazně vyšší než v předchozím případě.



Obrázek 3.8: Závislost hladiny akustického výkonu na otáčkách motoru pro výkonovou jednotku 15kW

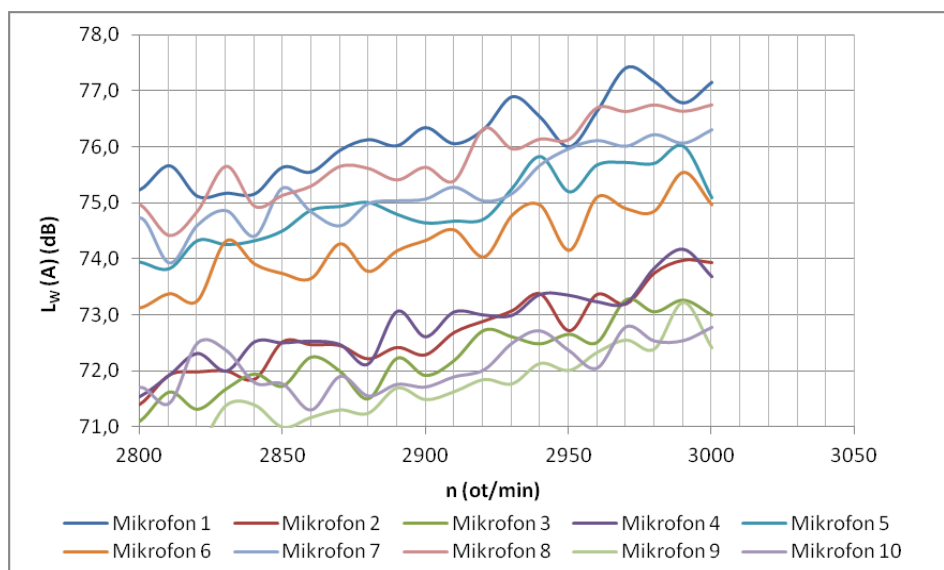
Vyhodnotíme-li průběhy z grafu 3.8 výkonové jednotky 15kW obdobně, jakožto v případě předchozím, nejnižší hodnotu bude představovat průběh mikrofonu 3 - 42,4 dB. Naopak nejvyšší hodnotu definuje mikrofon 6 - tedy 49,5 dB.

Porovnáme-li následný graf 3.9 s grafem 3.6, je možné vidět, že průběhy mikrofonu 7 nabývají v obou případech nejvyšších hodnot, zde 65,1 dB, zatímco průběh mikrofonu 1, je opět jako v předchozím případě na nejnižších hodnotách.



Obrázek 3.9: *Detailní zobrazení závislosti 1.20. pro rozsah otáček 1300-1500 ot./min, pro výkonovou jednotku 15kW*

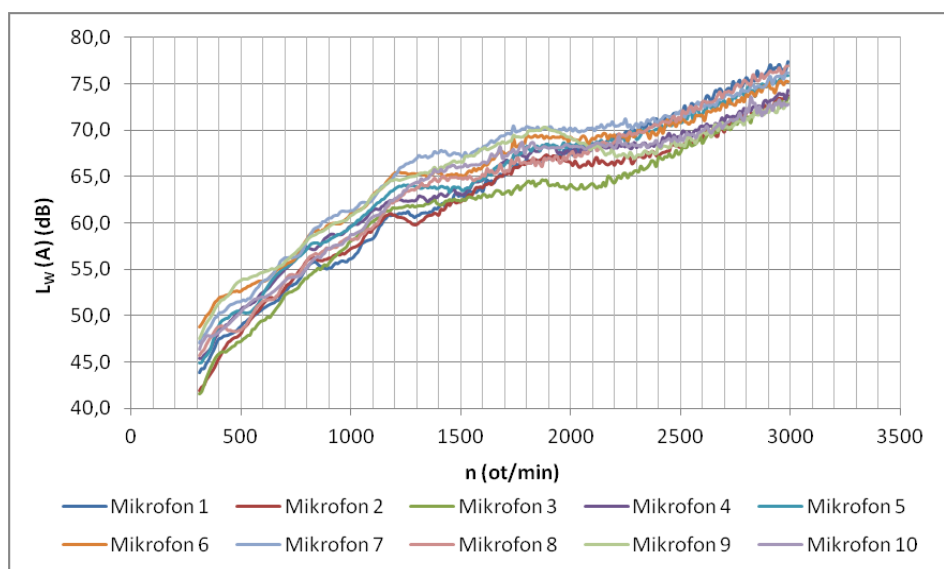
Závěrečný graf 3.10 z pohledu výsledků nedefinuje žádnou novou skutečnost. Nejvýraznější průběh zde opět tvoří mikrofon 1, jehož hodnota akustického výkonu je rovna 76,8 dB a představuje opět strmý vzrůst oproti předchozímu stavu.



Obrázek 3.10: *Detailní zobrazení závislosti 1.20. pro rozsah otáček 2800-3000 ot./min, pro výkonovou jednotku 15kW*

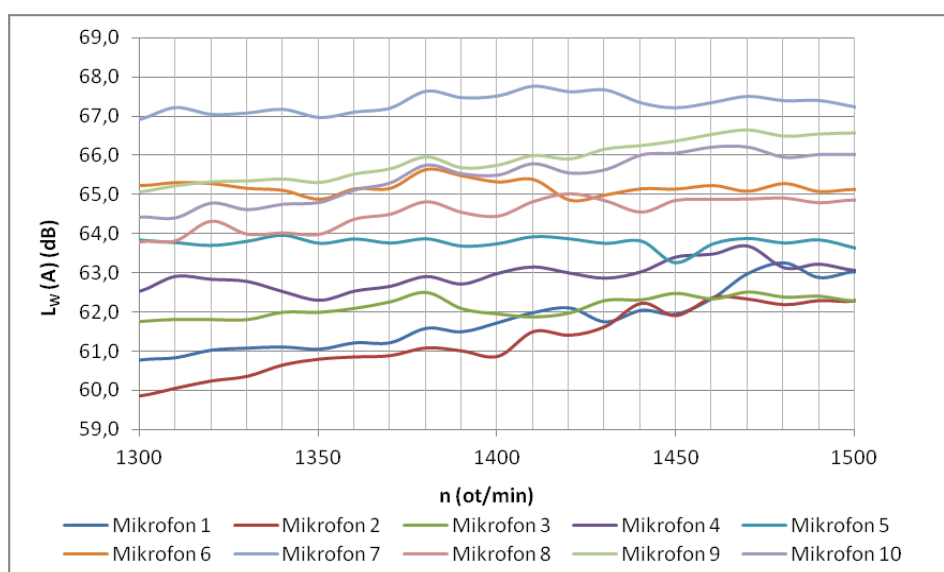
3.3.1.3 Výkonová jednotka 45kW

Poslední měřenou variantou je jednotka o výkonu 45kW, která byla prověřena pro případ nejnutnějšího využití měniče frekvence, např. při poruchách či jiném dočasném řešení napájení asynchronního motoru.



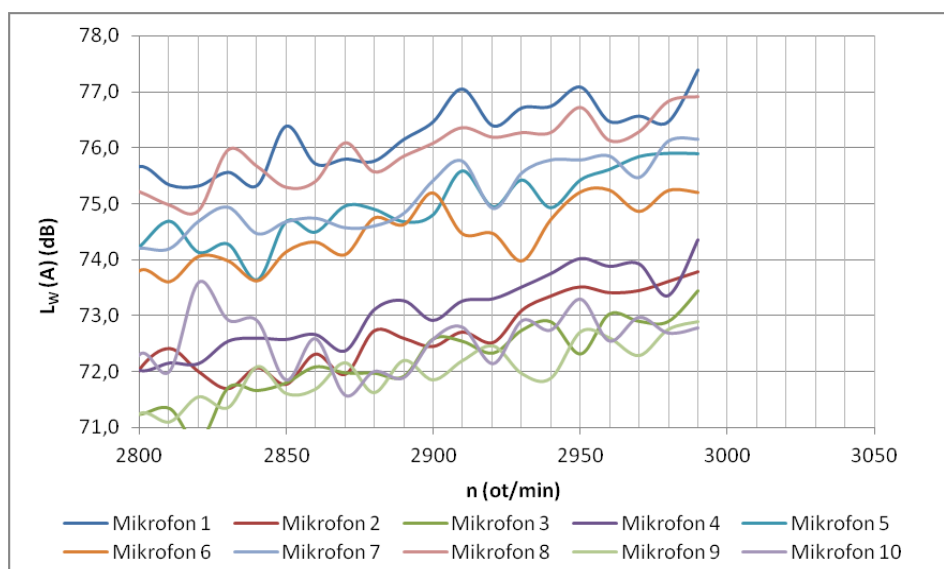
Obrázek 3.11: *Závislost hladiny akustického výkonu na otáčkách motoru pro výkonovou jednotku 45 kW*

Mikrofon 3 je i v tomto případě představitelem nejmenší hodnoty akustického výkonu 41,8 dB, přičemž nejvyšší hodnotu zobrazuje opět mikrofon 6 - 48,7 dB.



Obrázek 3.12: *Detailní zobrazení závislosti 1.23. pro rozsah otáček 1300-1500 ot./min, pro výkonovou jednotku 45 kW*

Na grafu 3.12 nelze pozorovat zásadní změnu v porovnání s příslušnými grafy, jelikož nejvyšší hodnotu pro chod naprázdno představuje opět mikrofon 7 s hodnotou 67,4 dB. Hladina akustického výkonu měřená mikrofonom 1 výrazněji narůstá až se zvyšujícími se otáčkami a jak je v grafu 3.13 patrné, nabývá hodnoty 76,5 dB.

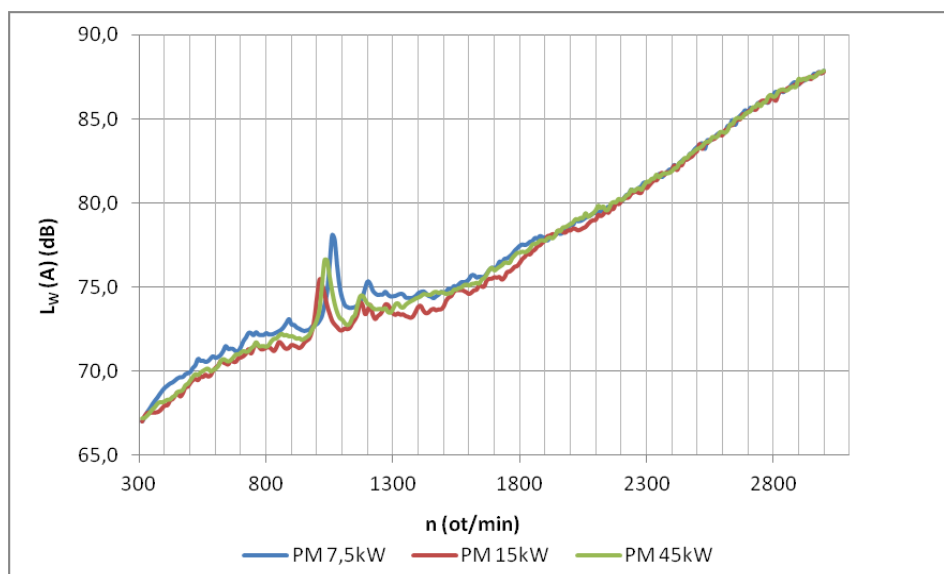


Obrázek 3.13: Detailní zobrazení závislosti 1.23. pro rozsah otáček 2800-3000 ot./min, pro výkonovou jednotku 45 kW

3.3.2 Výsledné měření hluku asynchronních motorů

Cílem této podkapitoly je seznámit čtenáře s výslednou podobou vyhodnocení akustického výkonu, kterou v současné době využívá firma Siemens pro každodenní vyhodnocování hluků motorů.

Jak jsme si již v teoretické části práce definovali - při jakémkoli měření mikrofony zaznamenávají hodnoty akustického tlaku L_p , které jsou poté dle příslušného vzorce 1.39, uvedeného také v normě EN 60034-9 popisující pravidla pro měření hluku točivých elektrických strojů, přepočítané na hodnoty akustického výkonu. V závislosti na osově výšce, polaritě a způsobu napájení měřeného motoru jsou již stanovené hodnoty dovolených hladin výše uvedenou normou.



Obrázek 3.14: Výsledná závislost hladiny akustického výkonu na otáčkách, pro zvolené typy výkonových jednotek

3.3.3 Výběr vhodné výkonové jednotky

Jak je možné vypořádat z grafu 3.14, pro různé výkonové moduly se hodnoty akustického výkonu, v rámci srovnání pro stejné otáčky, příliš neliší. Porovnáme-li k sobě maximální hodnoty akustického výkonu pro mikrofon 1, kde byl ve všech případech výsledný nárůst nejvyšší, zjistíme dle tabulky 3.1, že výsledné hodnoty akustických výkonů jsou téměř totožné.

Mikrofon 1	P= 7,5kW	P= 15kW	P= 45kW
L_W (A)	76,9dB	76,8dB	76,5dB

Tabulka 3.1: *Tabulka pro srovnání nejvyšší hodnoty akustického výkonu pro mikrofon 1*

Z tohoto tvrzení vyplývá, že velikost akustického výkonu není v tomto případě nijak významně závislá na zvolené výkonové jednotce měniče frekvence a záleží tedy pouze na zvážení a výběru jednotlivého uživatele.

Z hlediska možného přetěžování motoru během testovacích měření a skutečnosti, že při vyšších spínacích frekvencích dochází k redukci výkonu měniče, byla pro následující testy využita výkonová jednotka 15kW.

4 Porovnání měření hluku pro různé provozní stavy

Po zvolení vhodného výkonového modulu měniče frekvence můžeme přejít do hlavní části diplomové práce, která spočívá v analyzování hladin akustického výkonu pro různé provozní stavy.

V první části budeme sledovat rozdíly mezi síťovým napájením a napájením z měniče frekvence pro chod motoru naprázdno a při jmenovitém zatížení. Výsledky měření následně porovnáme s normou EN 60034-9, která definuje maximální hladinu akustického výkonu pro jednotlivé provozní stavy.

Další kapitola bude věnována analýze, ve které budou srovnány naměřené hodnoty pro napájení síťové a z měniče frekvence se složkami hluku mechanickými a ventilačními.

4.1 Vliv frekvenčního měniče na hluk napájeného motoru

V teoretické části byl popsán vliv neharmonického napájení, které jak víme, způsobuje nárůst hladin akustického výkonu. Zmíněné tvrzení ověříme v této kapitole, kde budeme měřit motor napájený z měniče kmitočtu a jako srovnávací měření pro ověření vlivu neharmonického napájení bude sloužit měření motoru se sinusovým napájením.

Na základě naměřených dat budeme sledovat čtyři provozní stavy, kterými jsou měření motoru naprázdno a při jmenovitém zatížení pro 50Hz a 60Hz. Při měření naprázdno uvažujeme hodnotu otáček blízkou $n \cong 1500 \text{ ot./min}$, při jmenovitém zatížení motoru $n \cong 1450 \text{ ot./min}$ pro 50Hz. Pro hodnotu napájecí frekvence 60Hz se otáčky naprázdno blížily $n \cong 1800 \text{ ot./min}$ a $n \cong 1750 \text{ ot./min}$ pro jmenovitou zátěž motoru.

Důležitou informací z hlediska vyhodnocení je, že hodnota akustického výkonu je vyhodnocována třetinooktávovou metodou a její výsledek je definován pro určitou oblast sledované frekvence. Samotné vyhodnocení akustického výkonu probíhá přes váhový filtr typu A, což je patrné i z popisů grafů či vztahů.

Všechna měření se prováděla za přibližně shodných podmínek, kdy v případě měření naprázdno se nejprve odměřila všechna měření tohoto typu a až poté následovala měření pro jmenovitou zátěž.

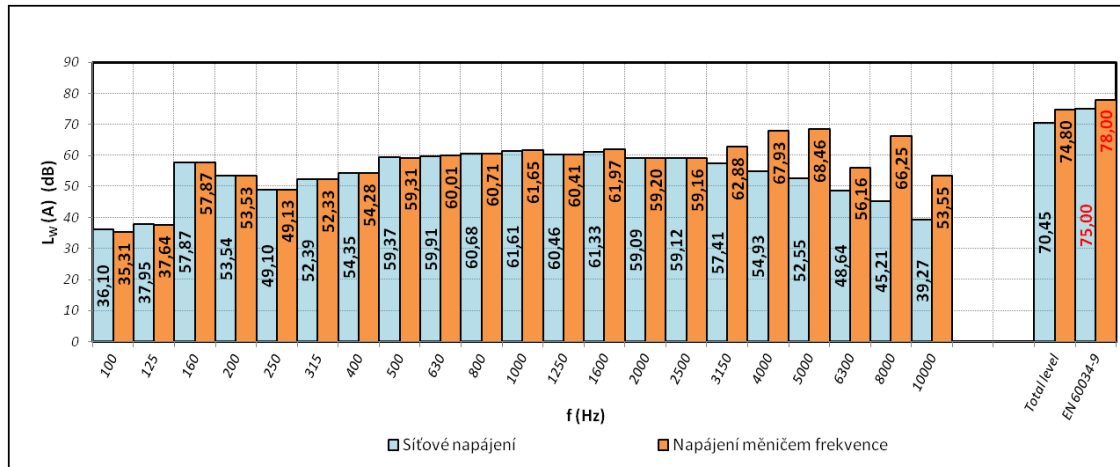
Veškerá měření budeme vyhodnocovat dle platné normy. Aby bylo možné definovat, zda motor vyhověl platné normě či ne, je nezbytné stanovit maximální hladiny akustického výkonu pro jednotlivá měření. Mezní hodnoty dovoleného akustického výkonu jsou uvedeny v následující tabulce:

Napájecí frekvence	Druh chodu motoru	L_{wmax} (A) (dB)
50Hz	Chod motoru při P_0	75
	Chod motoru při P_n	80
60Hz	Chod motoru při P_0	78
	Chod motoru při P_n	83

Tabulka 3.2: Maximální hodnoty akustického výkonu stanovené normou EN 60034-9, pro sinusové napájení motoru 1LE1092-1CB03-3AB4

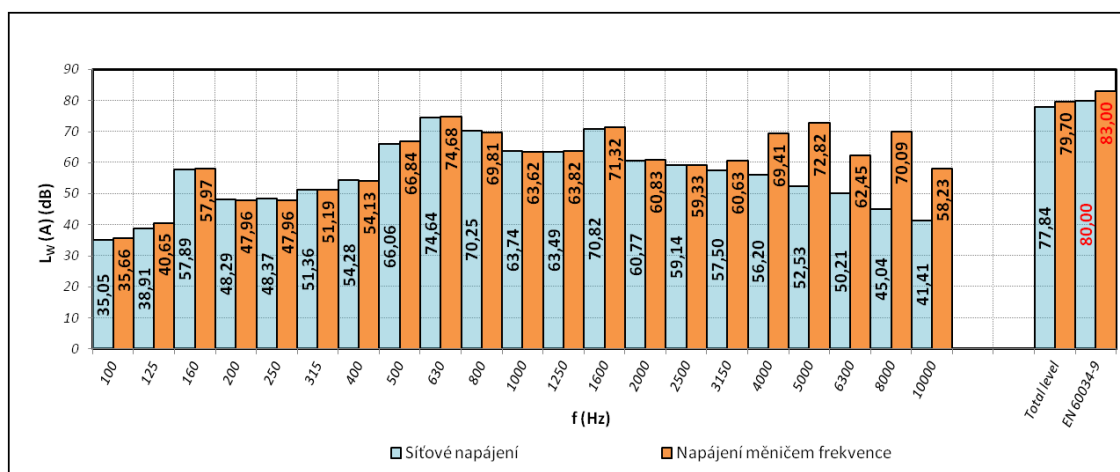
4.1.1 Měření pro napájecí frekvenci 50Hz

Prvním zkoumaným měřením v této podkapitole je měření naprázdno pro napájecí frekvenci 50Hz. Výsledky měření jsou patrné z obr. 3.15, přičemž největší nárůst akustického výkonu pro napájení z měniče kmitočtu je v oblasti spínací frekvence 4kHz, což potvrzuje teoretický předpoklad, dle kterého můžeme očekávat nárůst akustického výkonu právě při spínacím kmitočtu měniče či jeho dvojnásobku. Při výchozí hodnotě spínací frekvence 4kHz nabývá hodnota akustického výkonu 67,93dB a 66,25dB při dvojnásobné spínací frekvenci 8kHz. Celková hodnota akustického výkonu pro napájení z frekvenčního měniče je 74,8 dB, můžeme tedy toto měření z pohledu normy definovat jako vyhovující, jelikož maximální stanovená hodnota pro napájení měničem udává hodnotu 78 dB. Norma předpokládá přírůstek hladiny akustického výkonu 1 až 5 dB pro napájení pomocí měniče frekvence s napěťovým meziobvodem, kterého bylo využito právě v této práci. Pro vyhodnocení tohoto měření byl využit přírůstek 3 dB. Pro sinusový zdroj je maximální hodnota stanovená normou rovna 75 dB, přičemž bylo naměřeno 70,45 dB, tedy obě měření jsou vyhovující.



Obrázek 3.15: Grafické srovnání hladin akustického výkonu při napájení z měniče frekvence a sinusového zdroje pro stav naprázdno pro 50 Hz

Ve výše uvedeném grafu je možné pozorovat nárůst frekvence v oblasti 160Hz. Nahlédneme-li i do grafu 3.16, který znázorňuje shodný případ, ale při jmenovitém zatížení motoru, zjistíme, že nárůst frekvence nastává i zde a nabývá téměř shodných hodnot lišících se pouze v desetínách dB. Nárůst akustického výkonu pro tuto oblast frekvence je způsoben polohou pracovního bodu na magnetizační křivce. Ze zobrazených průběhů je patrné, že motor pracuje v saturační části křivky.



Obrázek 3.16: Grafické srovnání hladin akustického výkonu při napájení z měniče frekvence a sinusového zdroje pro jmenovité zatížení motoru pro 50 Hz

Mimo zmíněné nárůsty vlivem spínací a dvojnásobné hodnoty spínací frekvence, kde je hodnota akustického výkonu rovna 69,41 dB a při dvojnásobku dokonce 70,09 dB, stojí za zmínění také oblast frekvence 650Hz, která značí při jmenovité frekvenci 50Hz přítomnost 13. harmonické, která je definována v kapitole 2.1.7 za problematickou. Tento nárůst můžeme označit jako další elektromagnetický vliv, který můžeme důkladněji popsat následujícím odvozením

$$f = 50\text{Hz}$$

$$S = 36 \text{ drážek}$$

$$R = 28 \text{ drážek}$$

$$2p = 4$$

$$n_s = 1500 \text{ ot./min}$$

$$n = 1450 \text{ ot./min}$$

$$s = \frac{n_s - n}{n_s} = \frac{1500 - 1450}{1500} = 0,333$$

- kde
- S - počet drážek statoru,
 - R - počet drážek rotoru,
 - n_s - synchronní otáčku motoru,
 - n - jmenovité otáčky motoru,
 - s - skluz motoru.

Z výše uvedených parametrů motoru je možné stanovit frekvence, kde lze očekávat nejvyšší nárůst akustického výkonu.

$$f_{k1} = 2 \cdot f = 2 \cdot 50 = 100 \text{ Hz}$$

$$f_{k2} = \frac{2 \cdot f \cdot R \cdot (1-s)}{2p} - 2f = \frac{100 \cdot 36 \cdot (1-0,333)}{4} - 100 = 577 \text{ Hz}$$

$$f_{k3} = \frac{2 \cdot f \cdot R \cdot (1-s)}{2p} = \frac{100 \cdot 36 \cdot (1-0,333)}{4} = 677 \text{ Hz}$$

$$f_{k3} = \frac{2 \cdot f \cdot R \cdot (1-s)}{2p} + 2f = \frac{100 \cdot 36 \cdot (1-0,333)}{4} + 100 = 777 \text{ Hz}$$

kde f_{k1-4} sledovanou oblast frekvencí.

Dalším výpočtem definujeme tvarový modul, který určuje deformaci statorového svazku,

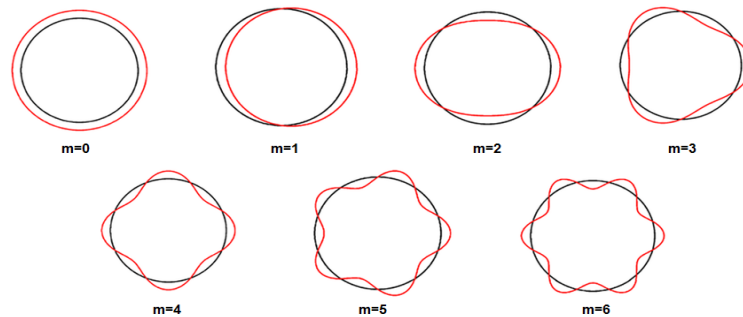
$$m_{k1} = \frac{|4p|}{2} = 4,$$

$$m_{k2} = \frac{|2R \cdot 2S - 4p|}{2} = 12,$$

$$m_{k3} = \frac{|2R \cdot 2S|}{2} = 8,$$

$$m_{k4} = \frac{|2R \cdot 2S + 4p|}{2} = 4,$$

přičemž zobrazení deformace popisující tvarový modul můžeme vyjádřit následujícím obrázkem



Obrázek 3.17: Příklady deformací jednotlivými tvarovými moduly

Z obr. 3.17 je patrné, že čím menší hodnota tvarového modulu, bude deformace nepříznivější. Jelikož je síla deformace úměrná kvadrátu magnetické indukce (s uvážením konstantní velikosti vzduchové mezery), je také možné pro čtyřpólový motor v oblasti frekvence 100 Hz definovat původ akustického výkonu jako čistě vibrační.

Zaměříme-li se na vypočtené frekvence f_{k2-4} a srovnáme je s měřením pro stav při zatížení – obr. 3.16, je patrné, že vypočtené hodnoty přesně definují nejvyšší nárůst akustického výkonu.

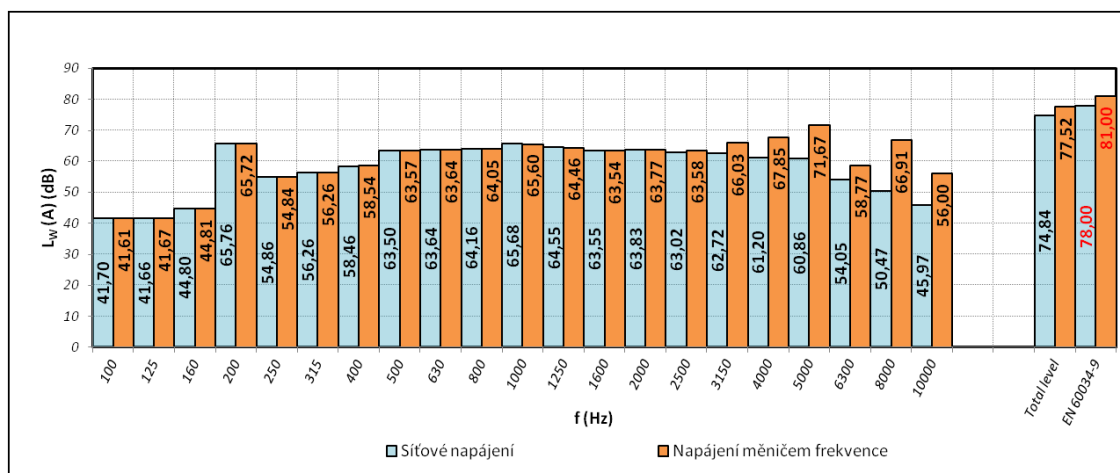
Hodnota akustického výkonu nabývá pro tuto harmonickou velikosti 74,68 dB, což je hodnota vyšší, nežli hodnota akustického výkonu při spínací frekvenci. Srovnáme-li oba způsoby napájení motoru s normou, pro napájení z měniče kmitočtu je celková hladina akustického výkonu rovna

79,7 dB, přičemž normou je stanovená maximální hodnota 83 dB, tedy motor je považován za vyhovující. Pro napájení ze sinusového zdroje je hodnota celkového akustického výkonu 77,84 dB, přičemž maximální hodnota dle normy je 80 dB.

4.1.2 Měření pro napájecí frekvenci 60Hz

Shodným způsobem, jako v případě kapitoly 4.1.1, bylo provedeno měření také pro napájecí frekvenci 60Hz.

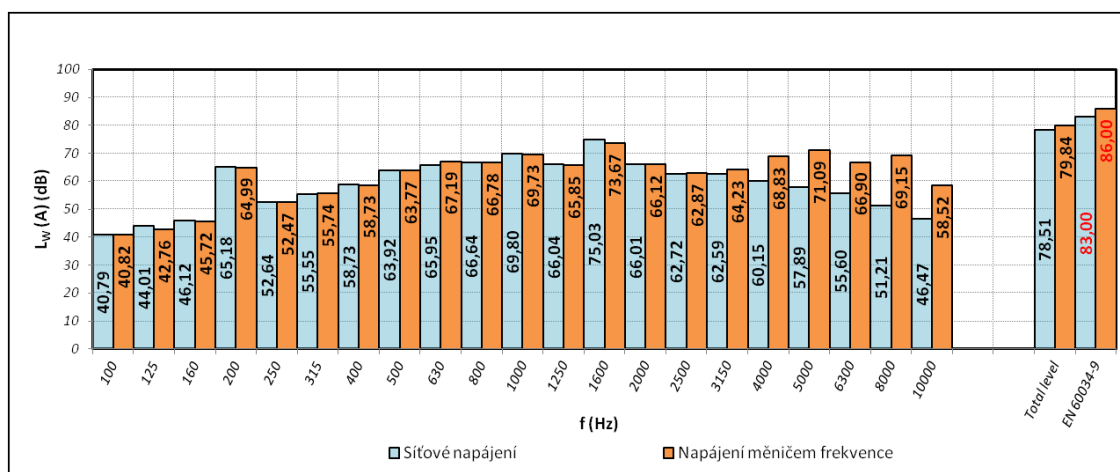
Obr. 3.18 znázorňuje měření akustického výkonu pro stav naprázdno, přičemž jako v předchozím případě, bylo provedeno měření i pro jmenovité zatížení motoru - na obr. 3.19.



Obrázek 3.18: Grafické srovnání hladiny akustického výkonu při napájení z měniče frekvence a sinusového zdroje pro stav naprázdno pro 60 Hz

Přirovnáme-li obr. 3.18 k předchozímu měření naprázdno pro 50Hz – obr. 3.15, zjistíme, že oba grafy jsou si velice podobné. Opět je zde patrný nárůst akustického výkonu v oblasti spínací a dvojnásobné hodnoty spínací frekvence, které pro první případ nabývají hodnoty 67,85 dB a pro druhý případ 66,91 dB. Při frekvenci 2000 Hz je možné sledovat nárůst hodnoty také pro sinusové napájení, které jsou, opět jako v předchozím případě měření pro frekvenci 50 Hz, téměř totožné. Nyní nabývají hodnoty cca 65,7 dB, stejný jev je možné sledovat také v grafu 3.19.

S ohledem na hodnoty stanovené normou opět motor vyhoví pro oba měřené případy. Pro sinusové napájení celková hodnota akustického výkonu činí 74,84 dB, přičemž hodnota stanovená normou pro napájecí frekvenci 60 Hz nabývá hodnoty 78 dB. Pro napájení měničem je maximální hodnota rovna 81 dB, přičemž naměřená 77,52 dB.



Obrázek 3.19: Grafické srovnání hladiny akustického výkonu při napájení z měniče frekvence a sinusového zdroje pro jmenovité zatížení motoru pro 60 Hz

Grafické vyjádření hladin akustického výkonu pro jmenovité zatížení motoru při 60 Hz obdobně jako v předchozích případech zobrazuje nárůst akustického výkonu v oblasti spínací frekvence měniče. Shodný je také nárůst v oblasti frekvencí 600-900 Hz. Tento nárůst má elektromagnetický původ, který je naznačen ve výpočtu pro 50 Hz. Obdobně jako pro 100 Hz při 50 Hz měření, bude představovat hodnota 120 Hz akustický výkon stejného původu, jakožto v předchozím případě.

Vyhodnocení akustického výkonu dle normy je, stejně jako v minulých případech, vyhovující, kdy pro sinusové napájení má celková hodnota akustického výkonu velikost 78,51 dB k 83 dB stanovených normou. Pro napájení z měniče frekvence je normovaná hodnota rovna 86 dB a celkový akustický výkon 79,84 dB.

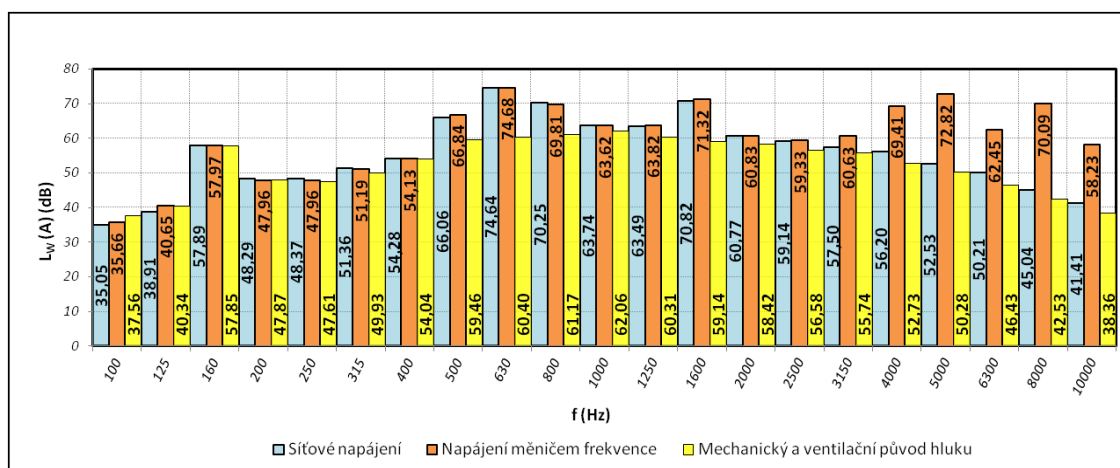
4.2 Mechanický a ventilační vliv na velikost hladin akustického výkonu

V předchozích dvou podkapitolách byly detailně rozebrány příčiny nárůstu akustického výkonu elektromagnetického původu. V této podkapitole se zaměříme na původ mechanický a ventilační.

Měření spočívalo v odpojení napájecího zdroje a roztočení motoru dynamometrem, přičemž byl motor roztočen na otáčky $n = 1450 \text{ ot./min}$ pro frekvenci 50 Hz, což má simulovat otáčky motoru při jmenovitém zatížení. Pro frekvenci 60 Hz byl motor roztočen ze stejného důvodu na otáčky $n = 1750 \text{ ot./min}$.

K průběhům akustického výkonu mechanického původu byla zahrnuta také měření akustického výkonu pro výše popsany stav při napájení měničem frekvence a síťového napájení, aby byl patrný přírůstek akustického výkonu způsobený právě měničem frekvence.

Na obr. 3.20 můžeme vidět porovnání výše uvedeného popisu pro napájecí frekvenci 50 Hz. Z uvedeného grafu je patrné, že akustický výkon vznikající mechanickým původem představuje dominantní část celkového akustického výkonu.

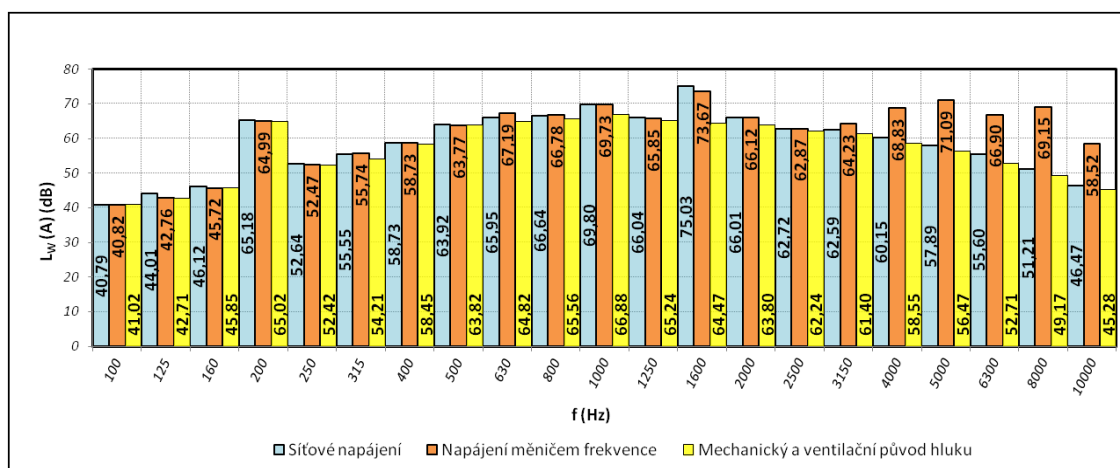


Obrázek 3.20: Grafické srovnání akustického výkonu, pro napájení měničem frekvence, síťového napájení, pro 50Hz a jmenovité zatížení, vůči akustickému výkonu mechanického původu

Pro zkoumanou frekvenci 160Hz byl v předchozí kapitole stanoven původ nárůstu akustického výkonu na základě pozice pracovního bodu v saturační části magnetizační křivky. Nyní je z grafu patrné, že toto tvrzení musíme upravit, jelikož je zde patrný také vliv mechanický. Určením této konkrétní frekvence dosáhneme jednoduchým vynásobením otáčkové frekvence čtyřpólového motoru s počtem lopatek ventilátoru. Jelikož se bavíme o jmenovitém napájení 50Hz a ventilátory v motorech Siemens jsou zpravidla konstruované pro 7 lopatek, má výsledná frekvence hodnotu 175Hz. Jak bylo již v úvodu této kapitoly zmíněno, grafy vyhodnocujeme třetinooktávovou metodou. Hodnota vypočtené frekvence bude tedy zahrnuta v definiční frekvenci 160 Hz.

Oblast frekvencí 100Hz, 500Hz-800Hz a 1600Hz vykazuje výrazný nárůst akustického výkonu vycházející z konstrukce motoru (tedy elektromagnetického původu), jelikož hodnoty akustického výkonu jsou jak pro sinusový zdroj, tak napájení z měniče kmitočtu téměř totožné. Velmi dobře patrný je také nárůst akustického výkonu vlivem spínací frekvence měniče.

Naopak na obr. 3.21 je velmi dobře vystižen ventilační původ hluku motoru vlivem vyšší napájecí frekvence 60Hz, tedy i vyšších otáček. Je tedy logické, že akustický výkon mechanického původu a ventilačního původu bude vlivem vyšších otáček nabývat vyšších hodnot, přičemž náhlé nárůsty akustického výkonu jsou způsobeny shodnými příčinami, jakožto v případě 50Hz měření, jen je třeba mít na paměti, že při případném ověřování měření teoretickým výpočtem je nutné uvažovat s napájecí frekvencí 60Hz.

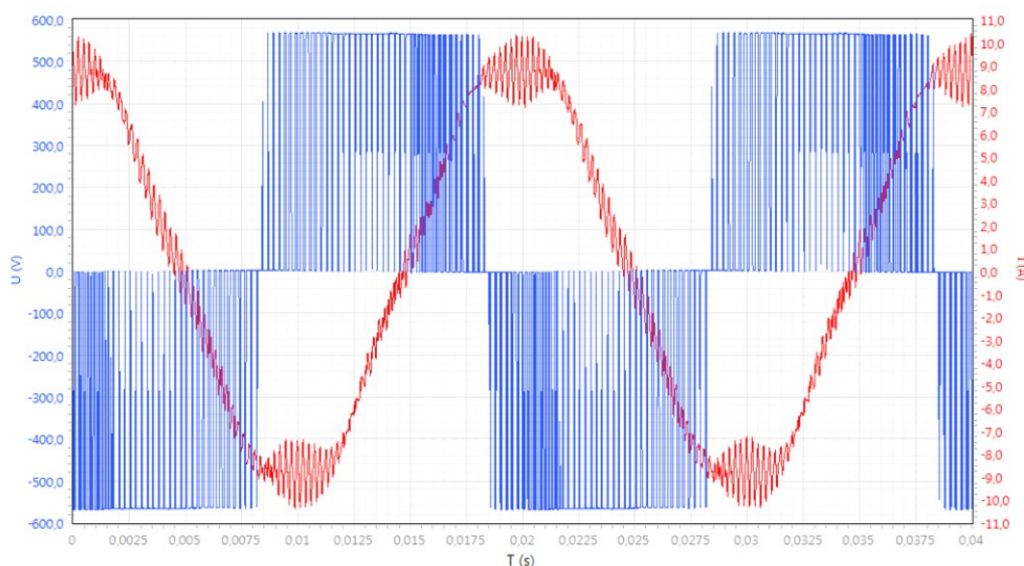


Obrázek 3.21: Grafické srovnání akustického výkonu, pro napájení měničem frekvence, síťového napájení, pro 60 Hz a jmenovité zatížení, vůči akustickému výkonu mechanického původu

4.3 Vliv spínací frekvence měniče frekvence na akustický výkon

V předchozích kapitolách jsme si na několika charakteristikách názorně představili vliv spínacího kmitočtu na nárůst akustického výkonu, vždy pro případ 4kHz, na kterou jsou měniče Siemens továrně nastaveny.

Obecně je možné říci, že spínací frekvence má přímý vliv např. na hluk, vibrace nebo účinnost motoru. Je to dáno četností spínání tranzistorů, která zapříčiní při nízké četnosti spínání velmi zdeformovanou sinusovou křivku proudu a naopak při vyšších spínacích frekvencích je možné dosáhnout čistě vyhlazeného průběhu proudu, a to bez použití dalších sinusových filtrů. Příklad zdeformovaného průběhu proudu možné vidět na následujícím obr. 3.22.



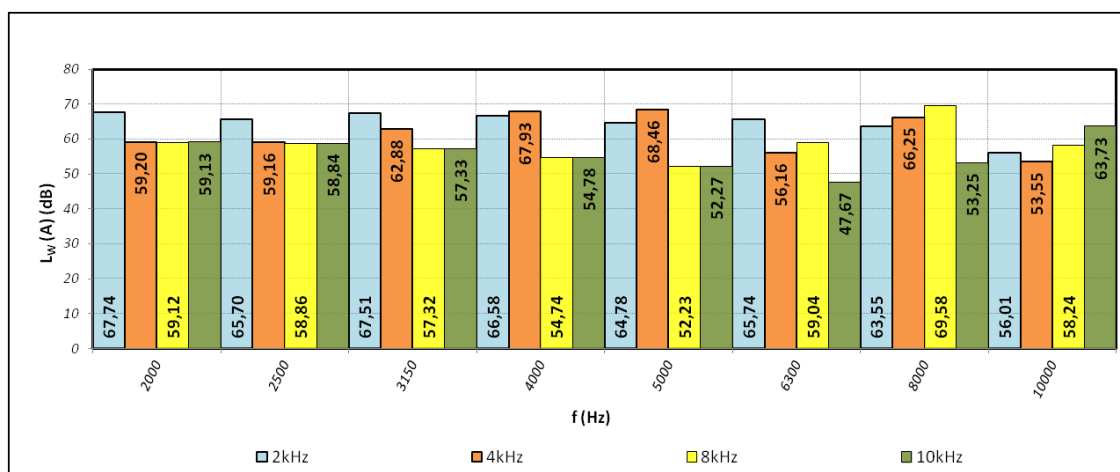
Obrázek 3.22: Příklad výstupního napětí a proudu z měniče kmitočtu

Pokud jsme zmínili výhody spínacích frekvencí, je nutné poukázat také na zápory. Zásadním negativním vlivem, který se projevil i na našem měření, je fakt, že vyšší spínací frekvence s sebou nesou také zvýšení výkonových ztrát. Důsledkem toho byl vybrán výkonový modul měniče frekvence

o větším výkonu. V praxi se i s ohledem na náklady ve většině případů využívá výkon výkonového modulu shodný s výkonem měniče, což by při využívání vyšších spínací frekvencí mohlo při velké zátěži motoru vést k problémům s napájením motoru. Dalším negativním vlivem, který se může při užívání frekvenčního měniče projevit, je rychlejší opotřebení výkonového modulu z důvodu vyššího spínání tranzistorů.

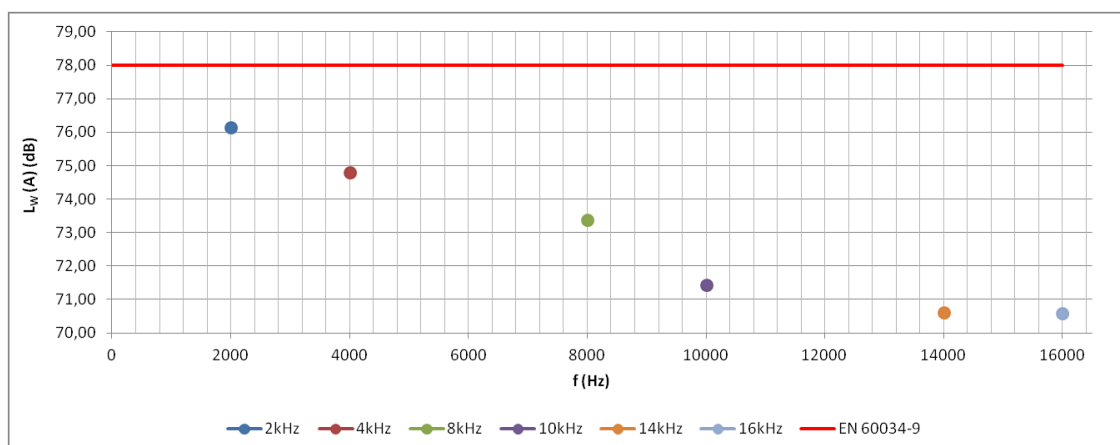
Přistupme nyní k samotnému ověření vlivu spínacích frekvencí na hluk motoru. V kapitolách 4.1.1 a 4.1.2 jsme velikosti celkového akustického výkonu získané měřením vztahovali k maximálním hodnotám akustického výkonu definovaným normou. Měření pro 50 i 60 Hz vycházela s dostatečnou tolerancí vzhledem k hladinám dovoleným normou, přičemž vyšších hodnot akustického výkonu bylo dosaženo pro frekvenci 50 Hz. Z tohoto důvodu byla provedena testovací měření pro napájecí frekvenci 50Hz, a to jak pro stav naprázdno, tak při jmenovitém zatížení pro spínací frekvence 2,4,8,10,12,16 kHz.

Graf 3.23 má za úkol zachytit vliv spínacích frekvencí v měřitelném rozsahu 2-10kHz, přičemž jako nejvyšší měřená oblast (pásmo) frekvence je normou definována hodnota 10 kHz, tedy i proto byly vybrány pro porovnání spínací frekvence 2,4,8 a 10 kHz.



Obrázek 3.23: Porovnání vlivu vybraných spínacích frekvencí na výsledný akustický výkon pro chod naprázdno

Zaměříme-li se na jednotlivé spínací frekvence, je opět patrné, že k nejvyššímu nárůstu akustického výkonu dochází právě při hodnotě spínací frekvence a jejím dvojnásobku, což je způsobeno silovými účinky, které rozechvějí stator i na dvojnásobné frekvenci, jedná se o duální případ s ohledem na akustický výkon způsobený vlivem vibrací pro frekvenci 100Hz definovanou v předchozích kapitolách. Budeme-li porovnávat velikosti akustických výkonů pro jednotlivé spínací frekvence, je na první pohled parné, že se zvyšující se spínací frekvencí klesá velikost akustického výkonu, což se projeví na následujícím obr. 3.24, který zobrazuje výsledný akustický výkon pro všechna zkoumaná měření spínacích frekvencí.



Obrázek 3.24: *Výsledný akustický výkon pro měřené spínací frekvence*

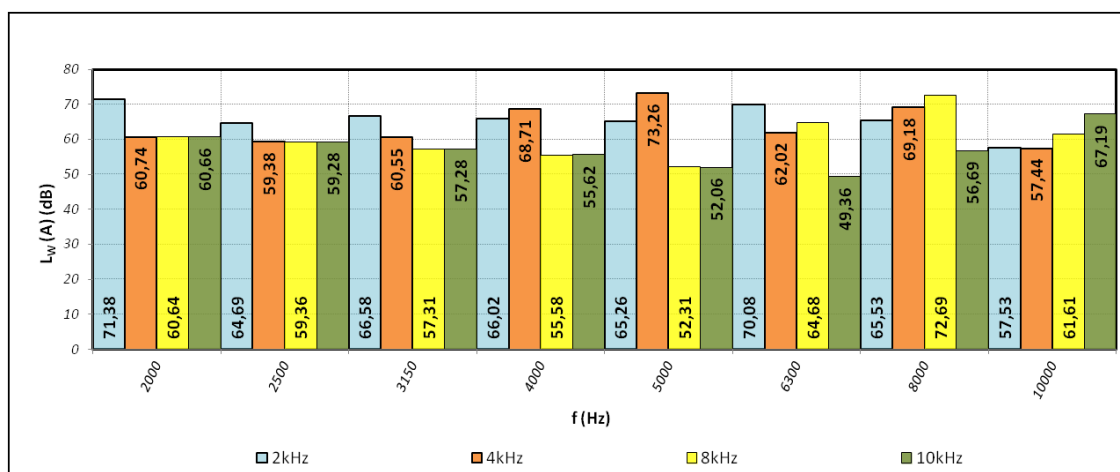
Jednoduchým náhledem je možné vidět, že při spínací frekvenci 8-10kHz dochází k nejvýraznějšímu poklesu akustického výkonu, který je při frekvencích 14 a 16 kHz je téměř totožný.

Porovnáme-li naměřené hodnoty s normou, můžeme vidět, že deformace sinusového průběhu nezpůsobila ani pro spínací frekvenci 2 kHz překročení dovolené velikosti akustického výkonu 78 dB, která byla stanovena normou pro měření naprázdno a s ohledem na přírůstek způsobený měničem frekvence. Výsledné hodnoty měření pro jednotlivé spínací frekvence jsou uvedeny v následující tabulce.

Spínací frekvence	2kHz	4kHz	8kHz	10kHz	14kHz	16kHz
L _w (A)	76,15dB	74,8dB	73,37dB	71,44dB	70,6dB	70,58dB

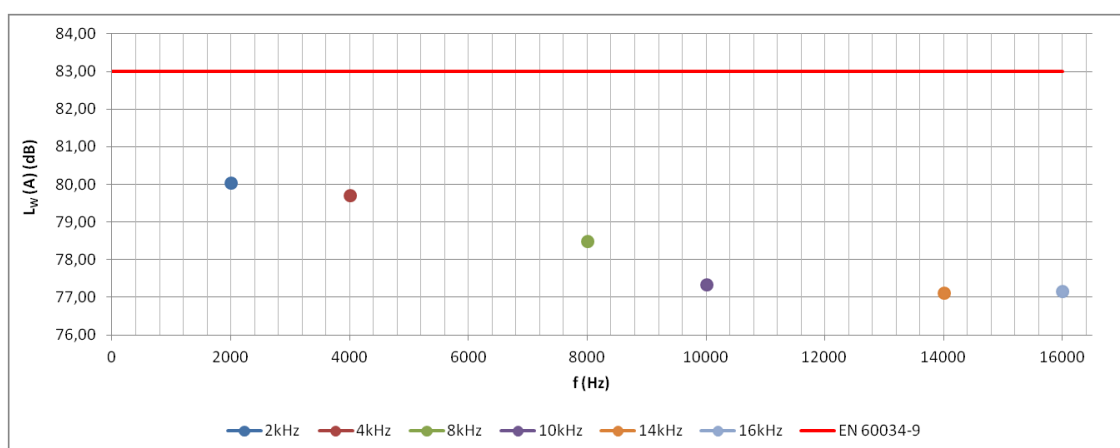
Tabulka 3.3: *Tabulka naměřených hodnot akustického výkonu pro měřené spínací frekvence, chod naprázdno*

Srovnávacím měřením k měření naprázdno bude opět zkouška při jmenovitém zatížení – viz obr. 3.25, které bylo vykonáno za stejných podmínek, jako tomu bylo v případě naprázdno. Srovnáme-li obě měření vzhledem k nárůstu akustického výkonu, vlivem jmenovitého zatížení motoru vzrostl akustický výkon přibližně o 4 dB u jednotlivých spínacích frekvencí. Obdobně jakožto i u měření naprázdno je nejvýraznější nárůst akustického výkonu pro spínací frekvenci 2kHz.



Obrázek 3.25: Porovnání vlivu vybraných spínacích frekvencí na výsledný akustický výkon pro chod při jmenovitém zatížení

Následující obr. 3.26 opět vyznačuje celkové hodnoty akustického výkonu při jmenovitém zatížení motoru. Výsledek je porovnatelný s měřením naprázdno, jelikož se celkový akustický výkon liší pouze v navýšených hodnotách vlivem zatížení motoru.



Obrázek 3.26: Tabulka naměřených hodnot akustického výkonu pro měřené spínací frekvence, chod naprázdno

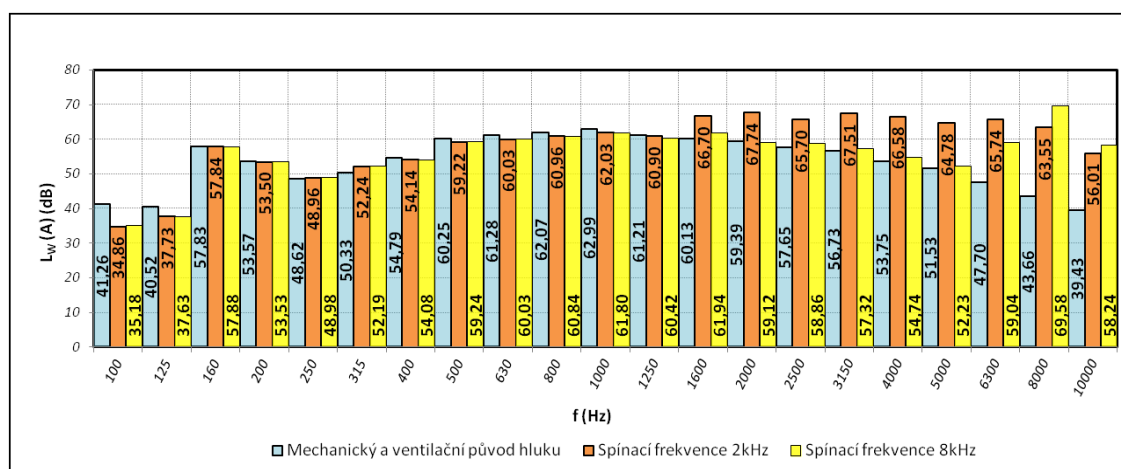
Pro chod při jmenovitém zatížení definuje norma maximální dovolenou hodnotu akustického výkonu 83 dB, kterou opět nepřekračuje ani měření při nejméně nepříznivém případě - spínací frekvenci 2 kHz. Konkrétní hodnoty měření je možné vidět v následující tabulce

Spínací frekvence	2kHz	4kHz	8kHz	10kHz	14kHz	16kHz
$L_W(A)$	80,03dB	79,7dB	78,49dB	77,34dB	77,12dB	77,17dB

Tabulka 3.4: Tabulka naměřených hodnot akustického výkonu pro měřené spínací frekvence, chod při jmenovitém zatížení

V posledním porovnání se budeme věnovat chodu naprázdno - konkrétně při jmenovitém kmitočtu 50Hz a jmenovitých otáčkách, pro nejnejpříznivější měření 2kHz a spínací frekvenci 8kHz

společně s mechanickými a ventilačními ztrátami viz obr. 3.27 – zde je velmi dobře patrný vliv mechanického i ventilačního původu.



Obrázek 3.27: Srovnání mechanického a ventilačního původu hluku s vybranými spínacími frekvencemi měniče

Pohledem na frekvenci v oblasti 500-800Hz se opět potvrzuje teoretický výpočet vlivu elektromagnetického, jelikož akustický výkon nabývá stejných hodnot pro obě spínací frekvence, stejný princip platí pro oblast frekvence 160Hz, kde je původem hluku opět elektromagnetický vliv společně s ventilačním, jak bylo popsáno dříve. V rozmezí frekvencí 2 kHz a 8 kHz se projevuje vliv spínací frekvence.

5 Závěrečné zhodnocení

Teoretická část je zaměřena na základní prvky teorie zvuku. Má za úkol čtenářům přiblížit fyzikální podstaty a způsoby vyhodnocování. Druhou částí teorie je definování zdrojů a příčin, které mají vliv na vznik hluku asynchronního motoru.

Úvodem do praktické části je výběr vhodných komponentů (frekvenčního měniče a asynchronního motoru). Zvolený motor byl vybrán v osově výšce 132, jelikož je zákazníky nejčastěji odebíranou osovou výškou závodu Siemens Mohelnice. Z různých variant motorů byl zvolen typ motoru, který je přímo určen pro chod s měničem frekvence a je tedy tomuto chodu také konstrukčně přizpůsoben. Volba frekvenčního měniče byla náročnější, protože je možné vybírat z mnoha druhů s ohledem na nové či starší modely nebo typ aplikace, pro kterou je frekvenční měnič určen. Po zvážení byl zvolen měnič s označením Sinamics G120, který je určen pro náročnější aplikace a tedy pro testování je vhodnější variantou, než měniče určené pro jednoúčelové stroje či například čerpadla nebo ventilátory.

V rámci této kapitoly byla také provedena první srovnávací měření, jejichž cílem bylo zjistit, zda se hodnota akustického výkonu bude měnit s různými typy výkonových modulů. Měniče Siemens mají velkou výhodu, co se týče jejich univerzality použití. S jednou řídicí jednotkou je možné napájet různé druhy výkonových jednotek s odlišným jmenovitým výkonem či možností aplikace, proto připojíme-li výkonovou jednotku vhodnou pro čerpadla, výsledkem bude měnič vhodný pro napájení čerpadel a ventilátorů. Takové modulárnosti bylo využito i v této práci, kdy pro měření výkonových jednotek 7,5kW, 15kW a 45kW byla použita pouze jedna řídicí jednotka a výměna jednotlivých výkonových modulů trvala pouze několik málo minut. Cílem měření bylo vyhodnotit nejzajímavější průběhy jednotlivých mikrofonů a stanovit příčiny hluku. Druhé měření naopak představuje graf charakterizující výsledný průběh, na základě kterého se vyhodnocují měření hluku na denní bázi v mohelnickém závodě.

Výsledkem této analýzy je zjištění, že hluk asynchronního motoru v tomto případě není závislý na typu výkonové jednotky z hlediska výkonu a tedy uživatel může brát v úvahu pouze technické využití měniče frekvence nebo jeho pořizovací cenu. Pro další měření byla dle uvážení zvolena výkonová jednotka 15kW.

První kapitola hlavní praktické části se zabývá srovnáním sinusového napájení s napájením z měniče frekvence. Porovnávány byly chody motoru naprázdno a při jmenovité zátěži pro napájecí kmitočet 50Hz a 60Hz. Z měření vyplynulo, že ke znatelným nárůstům akustického výkonu docházelo při vlastních spínacích frekvencích či jejich dvojnásobku. Zajímavé bylo také sledovat nárůst akustického výkonu v oblasti 100Hz - u všech uvedených závislostí v kapitolách 4.1.1 i 4.1.2 - reprezentující vliv vibrací na velikost hladin akustického výkonu. V oblasti frekvence pro 160 Hz pro 50Hz měření a 200 Hz pro 60Hz je nárůst akustického výkonu způsoben pozicí pracovního bodu ležící na magnetizační charakteristice, který se nachází v saturační oblasti křivky. Při srovnání grafů naprázdno a při jmenovitém zatížení bylo přínosné sledovat rozdíly obou závislostí v oblastech frekvence 600Hz - 800Hz. Zde se projevuje velikost akustického výkonu magnetizačního původu, což bylo dokázáno i teoretickým výpočtem.

Na závěr bylo každé měření vyhodnoceno dle normy EN 60034-9, která přesně definuje maximální hodnoty pro každý jednotlivý typ motoru, ať už z hlediska osové výšky, výkonu, napájecí frekvence, druhu provozu motoru a stanovuje také využití přírůstků akustického výkonu pro napájení z měniče frekvence. Výsledkem tohoto porovnání je, že motor ve všech měřeních vyhověl předepsaným požadavkům normy.

Další oblastí, která má velký přínos pro zákazníka, je srovnání mechanického a ventilačního původu nárůstu akustického výkonu s přírůstkem v důsledku síťového napájení a napájení z měniče frekvence. V kapitole 4.1.3 je možné sledovat porovnání zmíněných případů pro napájecí kmitočet 50 Hz a 60 Hz, pro jmenovité zatížení motoru. Právě pro napájecí kmitočet 60Hz jsou ventilační ztráty velmi zřetelné. Naopak při napájecím kmitočtu 50Hz jsou velmi dobře znázorněny nárůsty akustického výkonu elektromagnetického původu či vlivem spínací frekvence měniče.

Poslední prověřovanou kapitolou bylo zkoumání vlivu spínací frekvence na hladinu akustického výkonu. Jelikož při předchozím porovnávání naměřených hodnot s maximálními hodnotami stanovenými normou, vycházela měření pro 50 Hz nejbližší, bylo prozkoumáno, zda vlivem spínací frekvence dosáhneme snížení akustického výkonu. Z hlediska zpestření práce byla do měření zahrnuta spínací frekvencí 2kHz, což je hodnota nižší, nežli výchozí spínací hodnota měniče frekvence, a pro kterou by měla být logicky hladina akustického výkonu vyšší. Zmíněné se prokázalo. Při spínací frekvenci 2kHz bylo opravdu naměřeno vyšších hodnot akustického tlaku při porovnání s měřením pro výchozí spínací frekvenci. V dalších měřeních již byly zahrnuty pouze vyšší spínací frekvence, konkrétně 8,10,12 a 16 kHz. Zde bylo možné sledovat skokový pokles akustického výkonu pro spínací frekvence 8 a 10kHz, přičemž pro frekvence 12 a 16kHz nebyl již pokles nijak znatelný.

Vzhledem k nemalým pořizovacím nákladům frekvenčních měničů je vhodným řešením využívat výkonové moduly výkonnostně o třídu až dva vyšší v případě, že budeme nastavovat frekvenční měnič na vyšší spínací frekvence, což by v našem případě znamenalo použití prvního měřeného modulu 7,5kW. Vhodnou spínací frekvencí se dle výsledků jeví hodnota 8kHz, kde je již možné sledovat výrazné snížení hladiny akustického výkonu. Jelikož bylo při testování využíváno spínací frekvence čtyřikrát větší, než je výchozí hodnota, byl zvolen s ohledem na úbytek výkonu vlivem vyšší spínací frekvence výkonový modul 15kW.

Z hlediska hodnot stanovené normou se podařilo vlivem zvýšení spínací frekvence dosáhnout snížení hluku motoru.

Na práci je možné navázat dalším měřením s užitím sinusového filtru, který by napájecí proud z frekvenčního měniče vyhladil dokonaleji či doplněním měření o FFT analýzy, které jsou nyní součástí vývoje v Siemens Mohelnice. Výsledkem vývoje má být schopnost rozpoznat původ hluku asynchronních motorů pro každou jednotlivou frekvenci.

Seznam obrázků

Obrázek 1.1:	Šíření zvuku od zdroje ve formě vlnoploch [5].....	- 12 -
Obrázek 1.2:	Lineární oscilátor[5].....	- 12 -
Obrázek 1.3:	Časový průběh harmonického kmitání[5].....	- 13 -
Obrázek 1.4:	Časový průběh celkového statického tlaku ve vzduchu[5].....	- 16 -
Obrázek 1.5:	Schéma rovinné vlny[5].....	- 17 -
Obrázek 1.6:	Diskrétní spektrum periodického signálu[5].....	- 20 -
Obrázek 1.7:	Diskrétní spektrum neperiodického signálu[5].....	- 20 -
Obrázek 1.8:	Spojité spektrum[5].....	- 21 -
Obrázek 1.9:	Hladiny akustického tlaku v různém prostředí[5].....	- 23 -
Obrázek 1.10:	Spektrum intenzity zvuku pro $\Delta f = 1\text{Hz}$ [5].....	- 25 -
Obrázek 1.11:	Zdroj zvuku vyzařující rovnoměrně do všech směrů[5].....	- 26 -
Obrázek 2.1:	Deformace průběhu magnetické indukce ve vzduchové mezeře vlivem sycení železa...	- 30 -
Obrázek 3.1:	Použitý asynchronní motor značky Siemens - 1LE1092-1CB03-3AB4.....	- 38 -
Obrázek 3.2:	Měnič frekvence Sinamics G120, vlevo jednotka výkonová, vpravo jednotka řídicí.....	- 39 -
Obrázek 3.3:	Komora pro měření hluku.....	- 40 -
Obrázek 3.4:	Detailní zobrazení měřeného motoru s mikrofony 1-10 (M-1,..., 10).....	- 40 -
Obrázek 3.5:	Závislost hladiny akustického výkonu na otáčkách motoru pro výkonovou jednotku 7,5kW.....	- 41 -
Obrázek 3.6:	Detailní zobrazení závislosti 1.17. pro rozsah otáček 1300-1500 ot./min, pro výkonovou jednotu 7,5kW.....	- 42 -
Obrázek 3.7:	Detailní zobrazení závislosti 1.17. pro rozsah otáček 2800-3000 ot./min, pro výkonovou jednotu 7,5kW.....	- 42 -
Obrázek 3.8:	Závislost hladiny akustického výkonu na otáčkách motoru pro výkonovou jednotku 15kW.....	- 43 -
Obrázek 3.9:	Detailní zobrazení závislosti 1.20. pro rozsah otáček 1300-1500 ot./min, pro výkonovou jednotu 15kW.....	- 44 -
Obrázek 3.10:	Detailní zobrazení závislosti 1.20. pro rozsah otáček 2800-3000 ot./min, pro výkonovou jednotku 15kW.....	- 44 -
Obrázek 3.11:	Závislost hladiny akustického výkonu na otáčkách motoru pro výkonovou jednotku 45 kW.....	- 45 -
Obrázek 3.12:	Detailní zobrazení závislosti 1.23. pro rozsah otáček 1300-1500 ot./min, pro výkonovou jednotku 45 kW.....	- 45 -
Obrázek 3.13:	Detailní zobrazení závislosti 1.23. pro rozsah otáček 2800-3000 ot./min, pro výkonovou jednotku 45 kW.....	- 46 -
Obrázek 3.14:	Výsledná závislost hladiny akustického výkonu na otáčkách, pro zvolené typy výkonových jednotek.....	- 46 -
Obrázek 3.15:	Grafické srovnání hladin akustického výkonu při napájení z měniče frekvence a sinusového zdroje pro stav naprázdno pro 50 Hz.....	- 49 -

Obrázek 3.16:	Grafické srovnání hladin akustického výkonu při napájení z měniče frekvence sinusového zdroje pro jmenovité zatížení motoru pro 50 Hz	- 50 -
Obrázek 3.17:	Příklady deformací jednotlivými tvarovými moduly	- 51 -
Obrázek 3.18:	Grafické srovnání hladiny akustického výkonu při napájení z měniče frekvence a sinusového zdroje pro stav naprázdno pro 60 Hz	- 52 -
Obrázek 3.19:	Grafické srovnání hladiny akustického výkonu při napájení z měniče frekvence a sinusového zdroje pro jmenovité zatížení motoru pro 60 Hz.....	- 53 -
Obrázek 3.20:	Grafické srovnání akustického výkonu, pro napájení měničem frekvence, síťového napájení, pro 50Hz a jmenovité zatížení, vůči akustickému výkonu mechanického původu	- 54 -
Obrázek 3.21:	Grafické srovnání akustického výkonu, pro napájení měničem frekvence, síťového napájení, pro 60 Hz a jmenovité zatížení, vůči akustickému výkonu mechanického původu	- 55 -
Obrázek 3.22:	Příklad výstupního napětí a proudu z měniče kmitočtu	- 55 -
Obrázek 3.23:	Porovnání vlivu vybraných spínacích frekvencí na výsledný akustický výkon pro chod naprázdno	- 56 -
Obrázek 3.24:	Výsledný akustický výkon pro měřené spínací frekvence.....	- 57 -
Obrázek 3.25:	Porovnání vlivu vybraných spínacích frekvencí na výsledný akustický výkon pro chod při jmenovitém zatížení.....	- 58 -
Obrázek 3.26:	Tabulka naměřených hodnot akustického výkonu pro měřené spínací frekvence, chod naprázdno	- 58 -
Obrázek 3.27:	Srovnání mechanického a ventilačního původu hluku s vybranými spínacími frekvencemi měniče	- 59 -

Seznam tabulek

Tabulka 1.1:	Lineární a decibelová tabulka pro akustický výkon.....	- 22 -
Tabulka 2.1:	Jmenovité parametry motoru pro 50Hz	- 38 -
Tabulka 3.1:	Tabulka pro srovnání nejvyšší hodnoty akustického výkonu pro mikrofon 1	- 47 -
Tabulka 3.2	Maximální hodnoty akustického výkonu stanovené normou EN 600034-7, pro motor ILE1092-ICB03-3AB4.....	- 49 -
Tabulka 3.3:	Tabulka naměřených hodnot akustického výkonu pro měřené spínací frekvence, chod naprázdno	- 57 -
Tabulka 3.4:	Tabulka naměřených hodnot akustického výkonu pro měřené spínací frekvence, chod při jmenovitém zatížení.....	- 58 -

Použitá literatura

- [1] HAMATA, Václav. Hluk elektrických strojů, 1. vyd. Academia Praha, 1987.
- [2] KOPILOV, Igor Petrovič a kolektiv. Stavba elektrických strojů, Nakladatelství Energia, Moskva, 1980.
- [3] PATOČKA, Miroslav. Vybrané statě z výkonové elektroniky, Svazek II, Nakladatelství Brno, Zdeněk Novotný, 2004, ISBN 80-214-2743-4.
- [4] ČSN EN 60034-9:2003/A1:2007. Točivé elektrické stroje – část 9: Mezní hodnoty hluku ed.2, ČESKÝ NORMALIZAČNÍ INSTITUT, Praha, 2007.
- [5] NOVÝ, Richard. Hluk a chvění, 1. vyd. Česká technika – nakladatelství ČVUT, Praha, 2009, ISBN 978-80-01-04347-9.
- [6] SMETANA, Ctirad a kol.. Hluk a vibrace, měření a hodnocení, 1.vyd. Sdělovací technika, Praha, 1998, ISBN 80-901936-2-5.
- [7] ŽALUD, Václav. *Moderní radioelektronika*. 1. vyd. Praha: BEN, 2000, ISBN 80-86056-47-3.
- [8] Výkony, limity ČTU a GL č. 12/R/2000. *KHnet.info* [online]. Dostupné z: <http://forum.khnet.info/viewtopic.php?f=10&t=964#p7299>
- [9] HAŠA, Jaroslav. Chvění a hluk asynchronních strojů. Výzkumný a vývojový ústav elektrických točivých strojů, Brno, 1968.
- [10] MĚŘIČKA, Jiří. ZOUBEK, Zdeněk. Vybrané partie z elektrických strojů (Elektrické stroje III), 1.vyd. Ediční středisko CVUT, Praha, 1984.
- [11] DOWLING A.P.. Sound and sources of sound, Ellis Horwood Limited, 1983.
- [12] HASSALL, J. R, ZAVERI K.. Acoustic noise measurements, Brüel a Kjaer, 1988.